

# Approche performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) fondée sur les indicateurs de durabilité

**Véronique Baroghel-Bouny**

Directrice du Laboratoire « *FM2D* »

Université Paris Est – Institut Français des Sciences et Technologies  
des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux  
Champs sur Marne - France

---

*Journée Technique CEREMA Dter IdF / COTITA / AFGC  
« Approche performantielle et évolutions normatives »*

*23 Octobre 2014, Marne-la-Vallée, France*

# Plan



- 1 - *Introduction : nouvelle approche de la durabilité*
- 2 - **Indicateurs de durabilité** : caractéristiques et pertinence
- 3 - **Classes** associées aux indicateurs de durabilité
- 4 - **Spécifications** performantielles, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée
- 5 - **Prédiction de la durée de vie** des structures : **témoins de durée de vie** et modélisation "multi-niveaux"
- 6 - Conclusion : **boîte à outils** pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité

# 1 - EXEMPLES DE DÉGRADATIONS DE STRUCTURES EN BÉTON (ARMÉ)



Corrosion



Pont en bord de mer

[AFGC, 2004]

Alcali-réaction



[Baroghel-Bouny, T], 2005]

la durabilité ...  
question essentielle !



[Baroghel-Bouny et  
al., BLPC, 2004]

Corps d'épreuve exposé au gel et aux sels

Ecaillage



# 1 - LES DIFFÉRENTS OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ

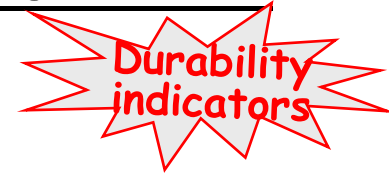


matériau

1

- **Évaluation** de la **durabilité "potentielle"** d'un béton armé sur la base de mesures sur éprouvettes de laboratoire + d'un système de **classes**
  - ↳ **comparaison** et classement de bétons  
(↗ sélection ou optimisation de formules, contrôle qualité, ...)

# 1 - LES DIFFÉRENTS OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ



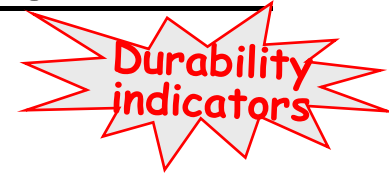
1

- **Évaluation de la durabilité "potentielle"** d'un béton armé sur la base de mesures sur éprouvettes de laboratoire + d'un système de **classes**
  - ↳ **comparaison** et classement de bétons  
(▲ sélection ou optimisation de formules, contrôle qualité, ...)

2

- **Conception de bétons pour une durabilité prédéfinie**
- **Qualification de formules de béton** pour une structure donnée sur la base de critères performantiels (**spécifications**)
  - ↳ cahiers des charges, règlements de conception, normes, ...

# 1 - LES DIFFÉRENTS OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ



1

- **Évaluation de la durabilité "potentielle"** d'un béton armé sur la base de mesures sur éprouvettes de laboratoire + d'un système de **classes**
  - ↳ **comparaison** et classement de bétons  
(▲ sélection ou optimisation de formules, contrôle qualité, ...)

2

- **Conception de bétons pour une durabilité prédéfinie**
- **Qualification de formules de béton** pour une structure donnée sur la base de critères performantiels (**spécifications**)
  - ↳ cahiers des charges, règlements de conception, normes, ...

3

- **Prédiction de la durée de vie** d'une structure (**phase de concept.**)
- **Diagnostic et prédiction de la durée de vie résiduelle** de structures existantes (éventuellement dégradées)
  - ↳ contrôle *in situ*
  - ↳ décision de réparation ou d'extension de la durée de service

➔ **Approche multi-niveaux**

# 1 - LA DURABILITÉ DANS LES NORMES

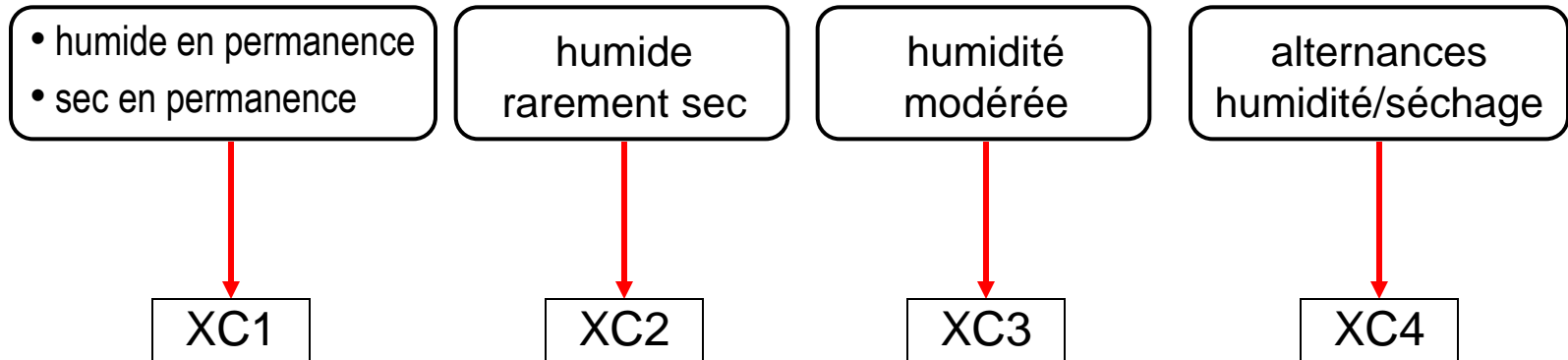


- ✘ **Définition** : la **durabilité** d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lequel il a été conçu et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement
- ✘ Elle dépend de nombreux paramètres dont la qualité de conception, la qualité des matériaux utilisés, la qualité des dispositions constructives et de la réalisation de l'ouvrage
- ✘ Elle est assortie de la **durée d'utilisation de l'ouvrage** (cf. *Eurocode 2*)
- ✘ Prise en compte *via* la notion de **classes d'exposition** (cf. *EN 206-1*) par la prescription de **valeurs limites** notamment sur la compo. ( $[E_{\text{eff}} / \text{Liant équiv.}] \text{ max. ; Classe de résist. min. ; Teneur en liant équiv. min. ; \% air min., ...}$ )
  - ⚡ La norme européenne **EN 206-1** fixe dans une **annexe informative** des valeurs limites en fonction de la classe d'exposition. L'**annexe nationale** complète ces dispositions par des valeurs limites applicables en France et rend celles-ci normatives dans 2 tableaux (**NA.F.1 & NA.F.2**)

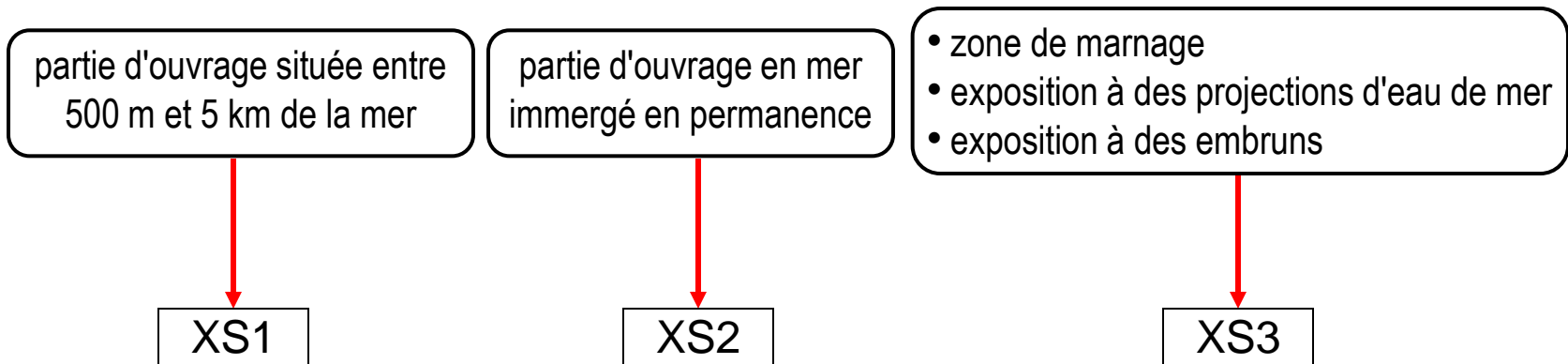
# 1 - LES CLASSES D'EXPOSITION



- **Exemple 1** : Corrosion induite par carbonatation (classe **XC**)



- **Exemple 2** : Corrosion induite par  $\text{Cl}^-$  présents dans l'eau de mer (classe **XS**)





# 1 - AVANTAGES DE LA NOUVELLE APPROCHE DE LA DURABILITÉ DANS LE CONTEXTE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



plus de liberté pour le concepteur

## ✘ Viser des niveaux de performance à atteindre

- ↳ permet de tirer pleinement parti des possibilités désormais offertes par les nouveaux concepts de formulation (B(T)HP, BAP, forts % d'add. minérales, combi. d'add.), sortant du champ couvert par les normes usuelles
- ↳ **solutions innovantes** (matériaux et structures "verts" & éco., composites, ...)



# 1 - AVANTAGES DE LA NOUVELLE APPROCHE DE LA DURABILITÉ DANS LE CONTEXTE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



plus de liberté pour le concepteur

## ✘ Viser des niveaux de performance à atteindre

- ↳ permet de tirer pleinement parti des possibilités désormais offertes par les nouveaux concepts de formulation (B(T)HP, BAP, forts % d'add. minérales, combi. d'add.), sortant du champ couvert par les normes usuelles
- ↳ **solutions innovantes** (matériaux et structures "verts" & éco., composites, ...)

## ✘ Approche globale

- prise en compte de la durabilité (matériau + structure) à long terme (durée de vie), dès la phase de conception
  - ↳ prévision & réduction coûts (gros entretien, réparation, ...), ...
- prise en compte de critères éco., sociaux, environnementaux, esthétiques, ...
  - ↳ gain au niveau de la qualité de vie, de l'insertion dans site nat. ou tissu urbain

durée de vie spécifiée

# 1 - AVANTAGES DE LA NOUVELLE APPROCHE DE LA DURABILITÉ DANS LE CONTEXTE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



plus de liberté pour le concepteur

## ✘ Viser des niveaux de performance à atteindre

- ↳ permet de tirer pleinement parti des possibilités désormais offertes par les nouveaux concepts de formulation (B(T)HP, BAP, forts % d'add. minérales, combi. d'add.), sortant du champ couvert par les normes usuelles
- ↳ **solutions innovantes** (matériaux et structures "verts" & éco., composites, ...)

## ✘ Approche globale

- prise en compte de la durabilité (matériau + structure) à long terme (durée de vie), dès la phase de conception
  - ↳ prévision & réduction coûts (gros entretien, réparation, ...), ...
- prise en compte de critères éco., sociaux, environnementaux, esthétiques, ...
  - ↳ gain au niveau de la qualité de vie, de l'insertion dans site nat. ou tissu urbain

## ✘ Spécifications performantielles relatives à la durabilité

- prise en compte de l'aspect "durabilité" dans les textes et projets
- matériaux (et structures) optimisés pour répondre à un cahier des charges
  - ↳ durée de vie + longue, nouveaux types de projets, architecture de demain, ...
  - ↳ garantie de durée de vie (& sécurité) avec des ss-produits et sans surcoût

durée de vie spécifiée

➔ **Contribution au développement durable**

# 1 - AVANTAGES DE LA NOUVELLE APPROCHE DE LA DURABILITÉ DANS LE CONTEXTE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



plus de liberté pour le concepteur

## ✘ Viser des niveaux de performance à atteindre

- ↳ permet de tirer pleinement parti des possibilités désormais offertes par les nouveaux concepts de formulation (B(T)HP, BAP, forts % d'add. minérales, combi. d'add.), sortant du champ couvert par les normes usuelles
- ↳ **solutions innovantes** (matériaux et structures "verts" & éco., composites, ...)

## ✘ Approche globale

- prise en compte de la durabilité (matériau + structure) à long terme (durée de vie), dès la phase de conception
  - ↳ prévision & réduction coûts (gros entretien, réparation, ...), ...
- prise en compte de critères éco., sociaux, environnementaux, esthétiques, ...
  - ↳ gain au niveau de la qualité de vie, de l'insertion dans site nat. ou tissu urbain

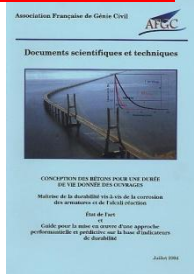
## ✘ Spécifications performantielles relatives à la durabilité

- prise en compte de l'aspect "durabilité" dans les textes et projets
- matériaux (et structures) optimisés pour répondre à un cahier des charges
  - ↳ durée de vie + longue, nouveaux types de projets, architecture de demain, ...
  - ↳ garantie de durée de vie (& sécurité) avec des ss-produits et sans surcoût

durée de vie spécifiée

➔ **Retour sur investissement supérieur**

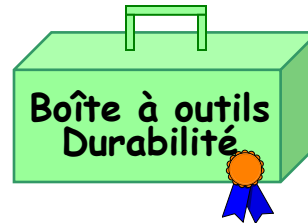
# 1 - APPROCHE FONDÉE SUR LES INDICATEURS DE DURABILITÉ



- ✘ **Description** : approche performantielle & prédictive de la durabilité
- ✘ **Référence** : document AFGC (état de l'art + guide) [AFGC, 2004], [AFGC, 2007]  
"Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages"

## ✘ **Principaux objectifs et applications:**

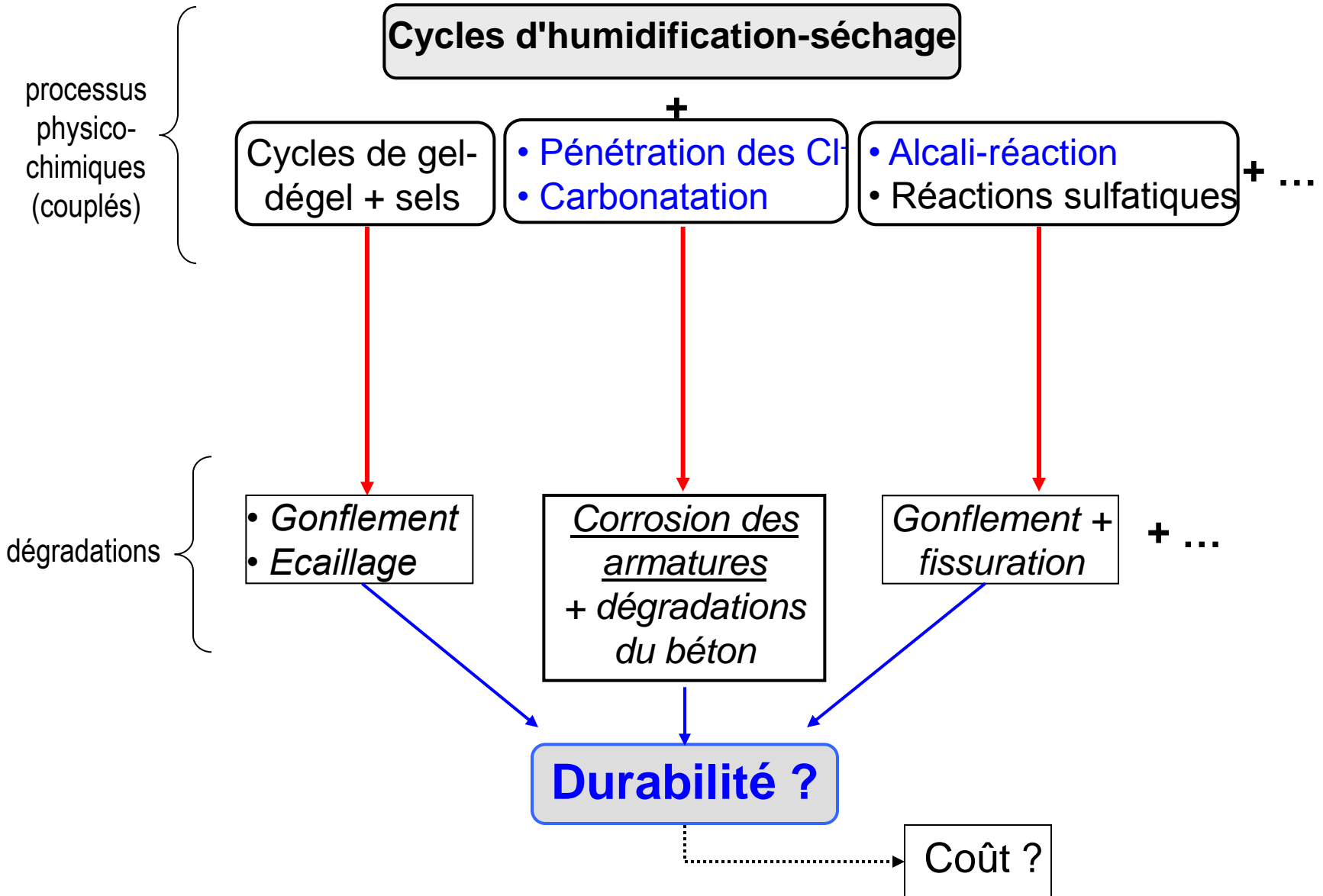
- conception de bétons pour une durée de vie donnée de l'ouvrage
- prédiction de la durée de vie
- suivi des structures existantes



- ➔ renforcer le lien entre **formulation** et **durée de vie** (structure)
- ➔ faciliter l'utilisation de **bétons "verts"** et assurer la **durabilité**
- ➔ aider au diagnostic et **optimiser le suivi** des structures

ACV

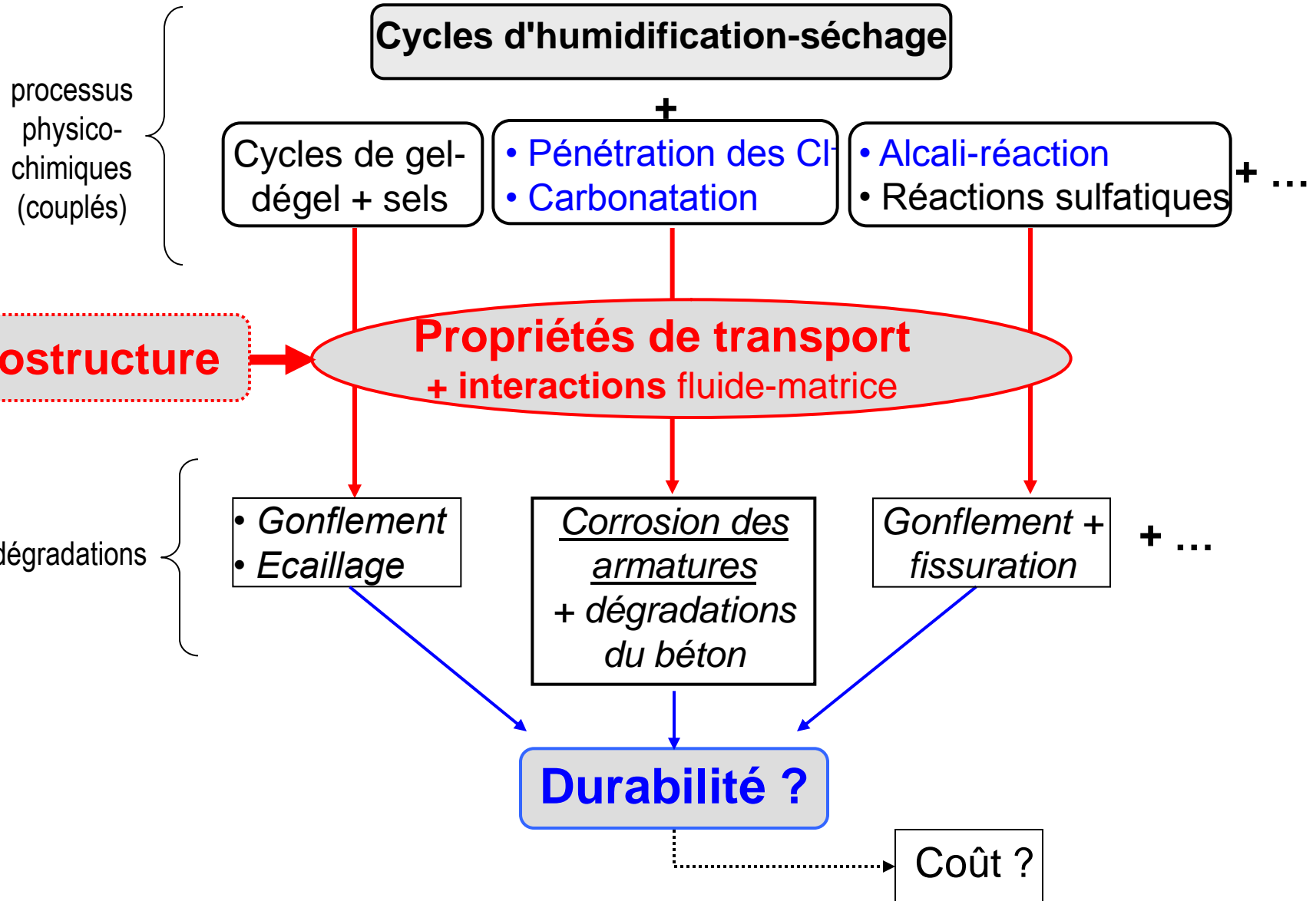
# 1 - LA DURABILITÉ : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE



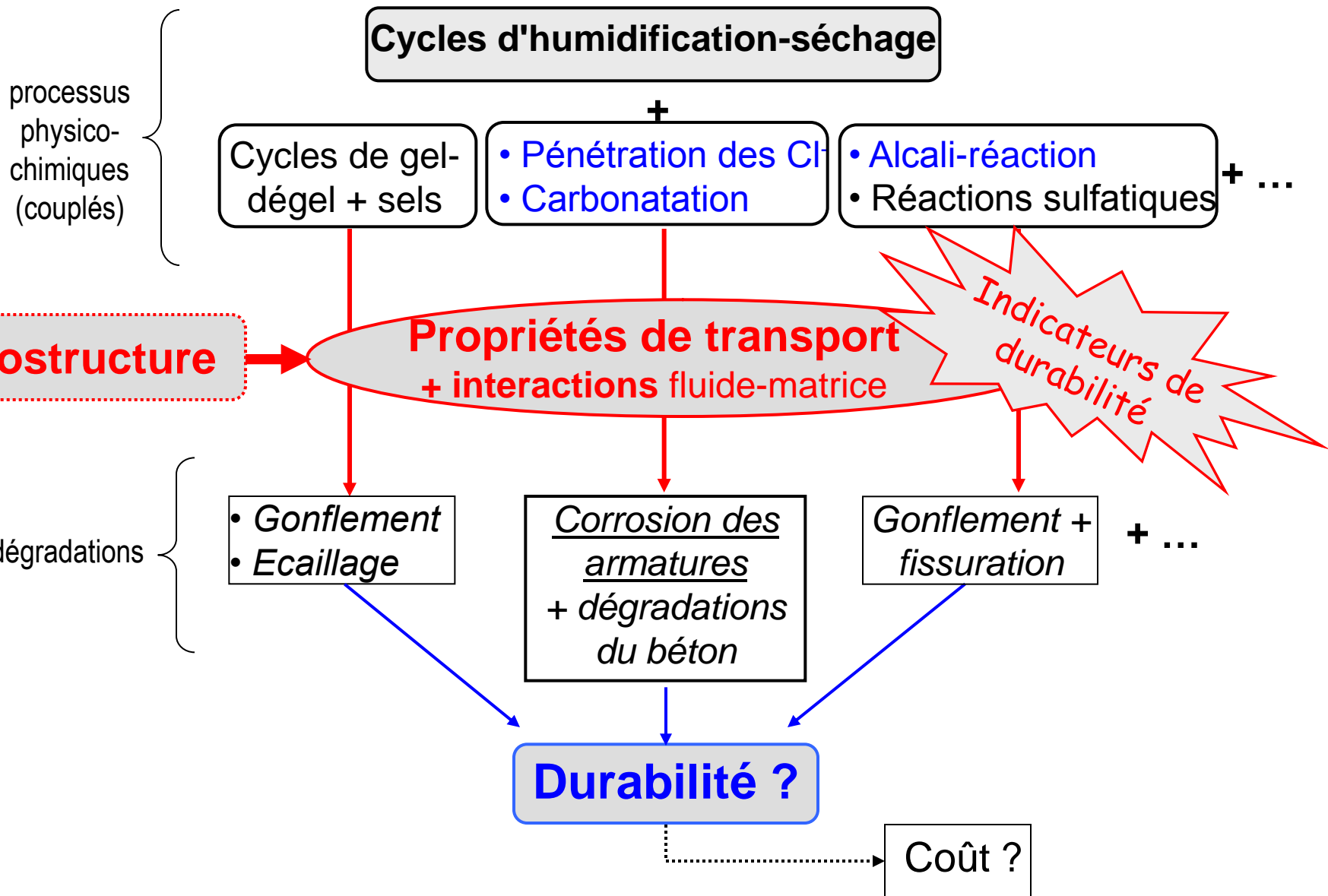
# 1 - LA DURABILITÉ : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE



\*\*\*\*\*



# 1 - LA DURABILITÉ : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

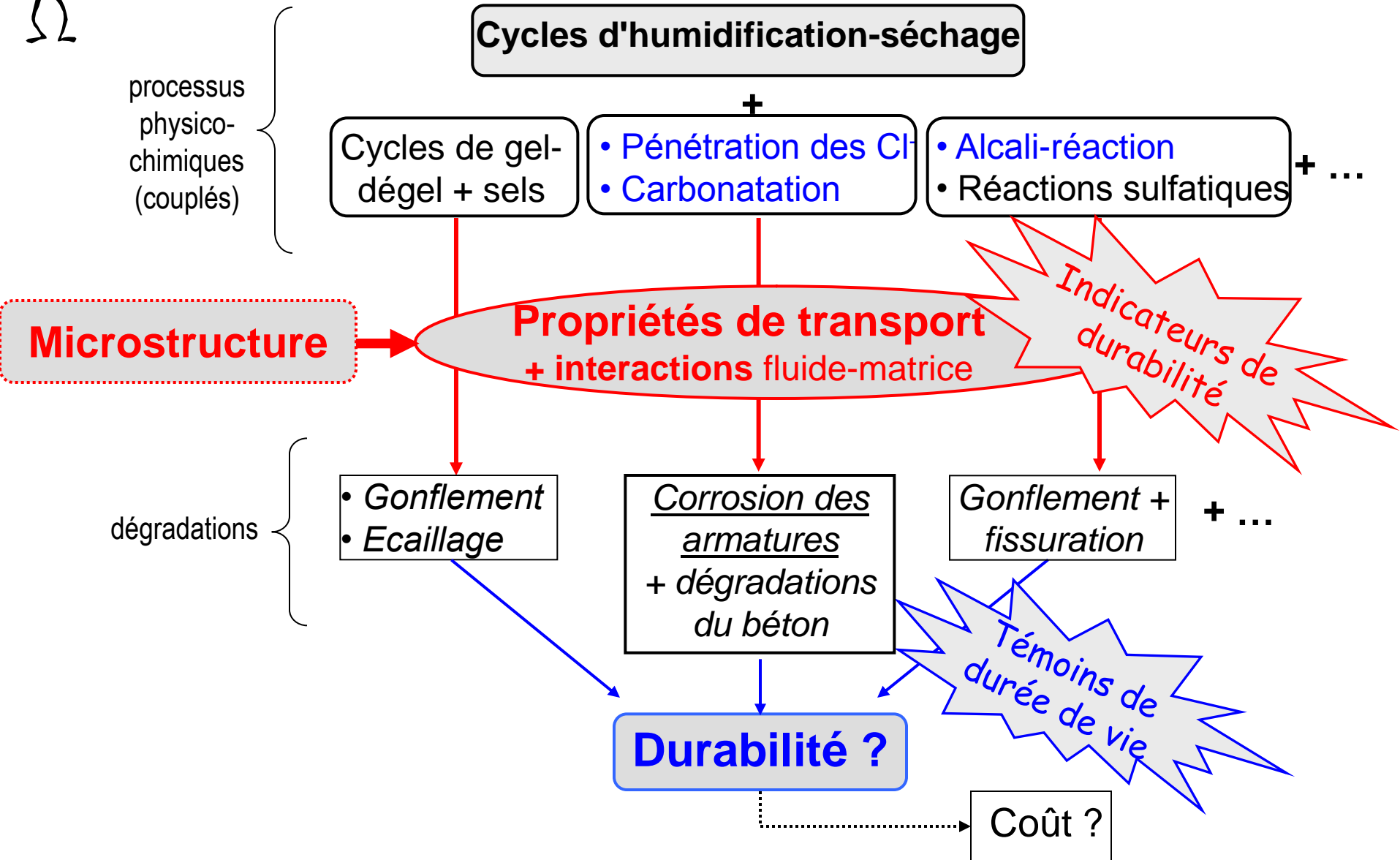





# 1 - LA DURABILITÉ : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE



\*\*\*\*\*



# Plan

- 1 - Introduction : nouvelle approche de la durabilité
-  2 - Indicateurs de durabilité : *caractéristiques et pertinence*
- 3 - Classes associées aux indicateurs de durabilité
- 4 - Spécifications performantielles, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée
- 5 - Prédiction de la durée de vie des structures : témoins de durée de vie et modélisation "multi-niveaux"
- 6 - Conclusion : boîte à outils pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité

## 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES



- ❖ **Pertinence théorique** ▲ paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité
- ❖ **Détermination fiable et facile** ▲ au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité, ..., adéquates), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements

1 →

indicateurs **généraux** (universels) valables pour différents types de dégradation



## 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES



- ✘ **Pertinence théorique** ▲ paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité
- ✘ **Détermination fiable et facile** ▲ au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité, ..., adéquates), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements

1 →

indicateurs **généraux** (universels) valables pour différents types de dégradation

- teneur (initiale) en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- porosité (accessible à l'eau)
- coef. de diffusion (*app. ou eff.*) des ions ( $\text{Cl}^-$ )
- perméabilité (aux gaz et/ou à l'eau liquide)

propriétés de transport

Sélection



[AFGC, 2004]

## 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES



- ⊠ **Pertinence théorique** ▲ paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité
- ⊠ **Détermination fiable et facile** ▲ au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité, ..., adéquates), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements

1 →

indicateurs **généraux** (universels) valables pour différents types de dégradation

2 →

indicateurs **spécifiques** à un processus de dégradation donné (alcali-réaction, dégradations dues au gel, ...)

↓  
Exemple : Quantité de silice passant en solution basique



## 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES



- ⌘ **Pertinence théorique** ▲ paramètres-clés (matériau) pour la quantification (équations) et la prédiction (modèles) de la durabilité
- ⌘ **Détermination fiable et facile** ▲ au moyen d'essais de laboratoire validés (précision, reproductibilité, ..., adéquates), sur éprouvettes de laboratoire ou sur prélèvements

1 →

indicateurs **généraux** (universels) valables pour différents types de dégradation

2 →

indicateurs **spécifiques** à un processus de dégradation donné (alcali-réaction, dégradations dues au gel, ...)

3 →

paramètres complémentaires (optionnels)

⚡ ***seuls quelques paramètres sont requis ...***



## 2 - PERTINENCE THÉORIQUE DE LA TENEUR EN $\text{Ca(OH)}_2$



- Agressions chimiques d'origine externe

$\text{Ca(OH)}_2$  ▲ forte solubilité

↳ très sensible aux agressions chimiques externes (attaques acides)

↳ *lixiviation (effet négatif)*

- Alcali-réaction

$\text{Ca(OH)}_2$  ▲ source d'ions  $\text{Ca}^{++}$

↳ *rôle important dans la précipitation de produits expansifs (effet négatif)*

- Corrosion des armatures

Dans un matériau sain :  $\text{NaOH} + \text{KOH} + \text{Ca(OH)}_2$  ▲  $\text{pH} \approx 13,5$

Réserve de  $\text{Ca(OH)}_2$  ▲ effet tampon ( $\text{pH} = 12,4$ ) dans solution interstitielle

↳ maintien d'un pH basique

↳ *assurance et maintien de la passivation des armatures (effet positif)*

or  $\text{Ca(OH)}_2$  est le ppal produit d'hydratation touché par la carbonatation

↳ *teneur en  $\text{Ca(OH)}_2$  ▲ donnée d'entrée des modèles de carbonatation*

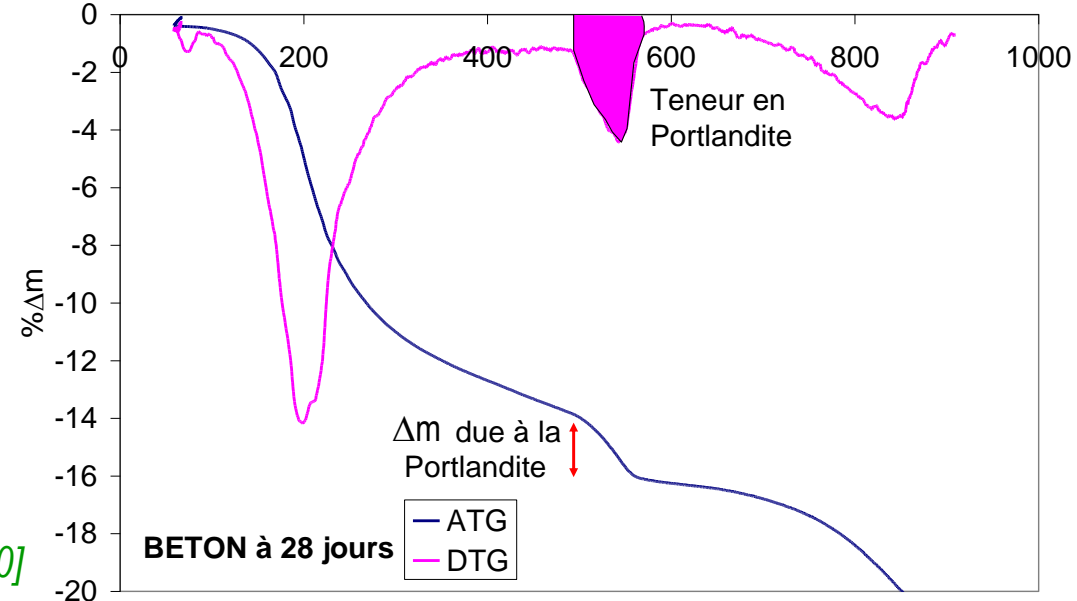
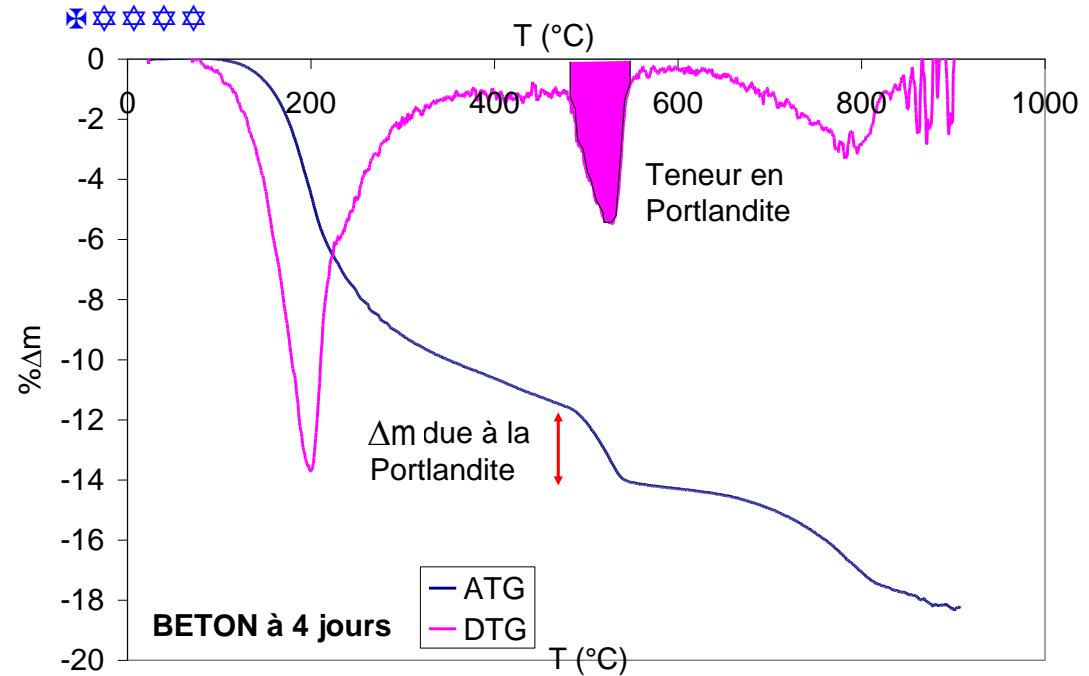
➔ ***teneur en  $\text{Ca(OH)}_2$  : indicateur de durabilité général***  
*(mesurée par ATG)*

## 2 - MESURE DE LA TENEUR EN $\text{Ca(OH)}_2$ PAR ATG/ATD

- Mesure de la variation de la masse en fonction de la température
- Deshydroxylation de la portlandite autour de **550°C**



[Carcasses, 2010]





## 2 - PERTINENCE DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU



- Évaluation de la qualité générale du matériau (paramètre global)
- Contrôle de la production de bétons ayant des caractéristiques prédéfinies
- Calcul d'autres indicateurs de durabilité (Exemple : sert à calculer le coefficient de diffusion du CO<sub>2</sub>)
- Spécifications de durabilité limitées à des seuils sur ce paramètre dans le cas [formule simple + ouvrage-type + environnement peu agressif + durée de vie courte]
- Prédiction de la durée de vie (données d'entrée de tous les modèles, ...)
- Détermination facile : **pesée hydrostatique** [NF P18-459]

## 2 - PERTINENCE DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU



- Évaluation de la qualité générale du matériau (paramètre global)
- Contrôle de la production de bétons ayant des caractéristiques prédéfinies
- Calcul d'autres indicateurs de durabilité
- Spécifications de durabilité limitées à des seuils sur ce paramètre dans le cas [formule simple + ouvrage-type + environnement peu agressif + durée de vie courte]
- Prédiction de la durée de vie (données d'entrée de tous les modèles, ...)
- Détermination facile : **pesée hydrostatique** [NF P18-459]

↳ calcul de la porosité

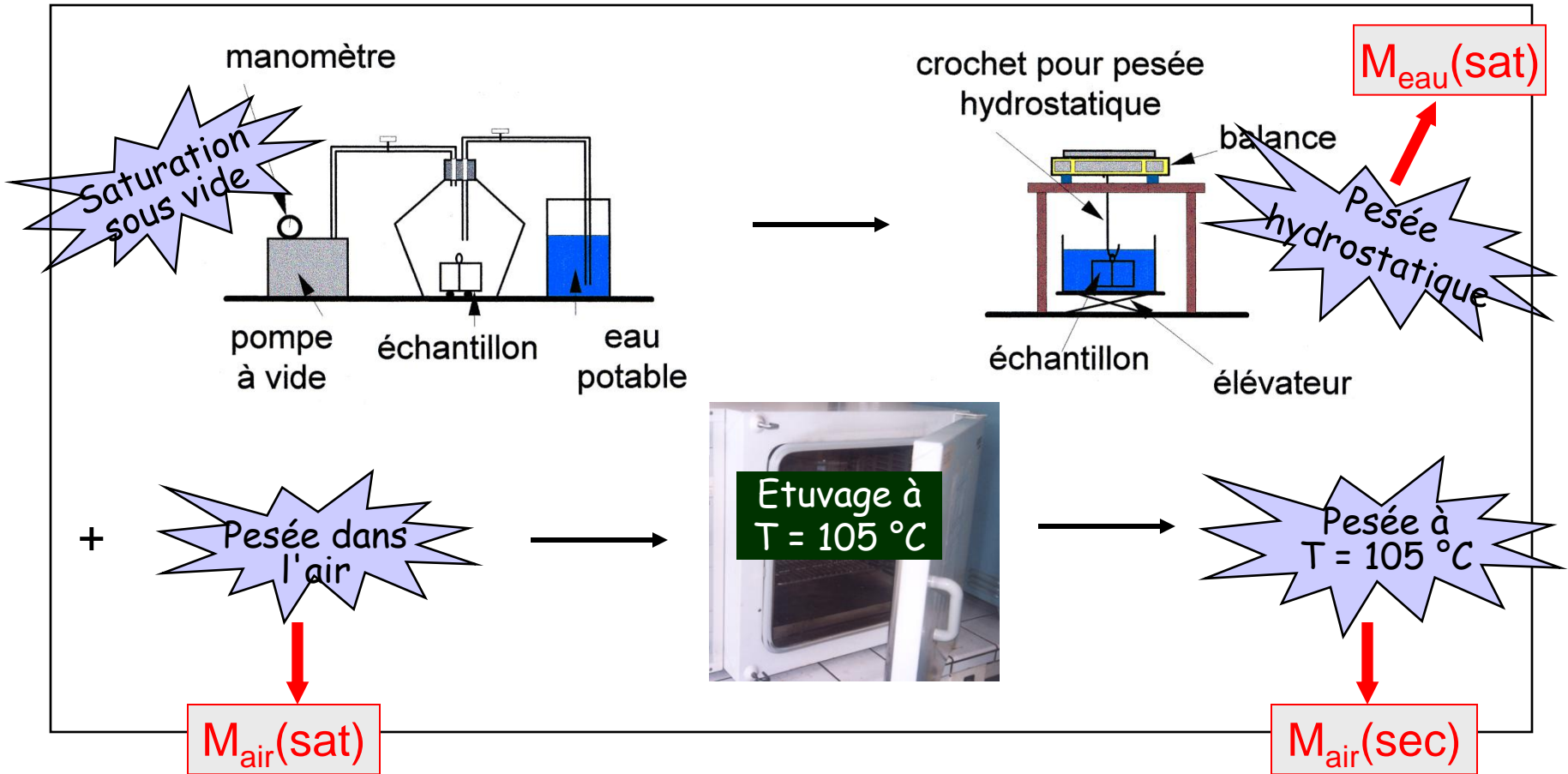
$$P_{\text{eau}} = \frac{M_{\text{air}}(\text{sat}) - M_{\text{air}}(\text{sec})}{M_{\text{air}}(\text{sat}) - M_{\text{eau}}(\text{sat})} \cdot 100 \quad (\text{en } \%)$$

➔  **$P_{\text{eau}}$  : indicateur de durabilité général**

## 2 - MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE A L'EAU



### ✘ Pesée hydrostatique [NF P18-459]



➔ **détermination facile**

## 2 - COEFFICIENTS DE DIFFUSION DES IONS Cl<sup>-</sup> : PERTINENCE THÉORIQUE



✘ paramètres-clés dans les lois décrivant la pénétration des ions Cl<sup>-</sup>

- ↳ **D<sub>eff</sub>** : "pure" propriété de transport (1<sup>ère</sup> loi de *Fick* ou *éq. de Nernst-Planck*)
- ↳ **D<sub>app</sub>** : prend en compte les interactions (2<sup>ème</sup> loi de *Fick*) ▲ description réaliste

modèles physiques

modèles empiriques

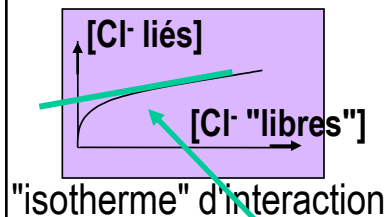
## 2 - COEFFICIENTS DE DIFFUSION DES IONS Cl<sup>-</sup> : PERTINENCE THÉORIQUE



✘ paramètres-clés dans les lois décrivant la pénétration des ions Cl<sup>-</sup>

- ↳  $D_{\text{eff}}$  : "pure" propriété de transport (1<sup>ère</sup> loi de *Fick* ou éq. de *Nernst-Planck*)
- ↳  $D_{\text{app}}$  : prend en compte les interactions (2<sup>ème</sup> loi de *Fick*) ▲ description réaliste

Relation théorique entre les coefficients "**effectif**" et "**apparent**" :



$$D_{\text{eff}} = \left( P_{\text{eau}} + \rho \cdot \frac{dm_b}{dc_f} \right) \cdot D_{\text{app}}$$

$P_{\text{eau}}$  : porosité à l'eau  
 $\rho$  : masse volumique

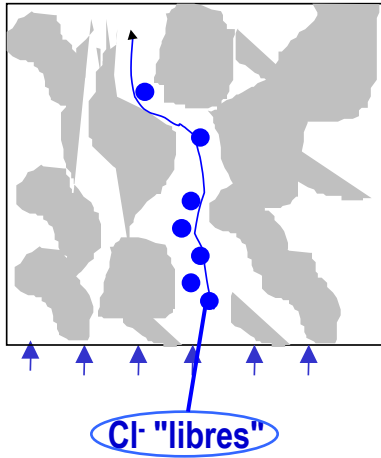
➔  $D_{\text{eff}}$  et  $D_{\text{app}}$  : indicateurs de durabilité

↙ le choix entre  $D_{\text{app}}$  et  $D_{\text{eff}}$  dépendra de l'objectif de l'investigation et de l'utilisation que l'on souhaite faire de ce paramètre dans la pratique

**Capacité de fixation des Cl<sup>-</sup>**

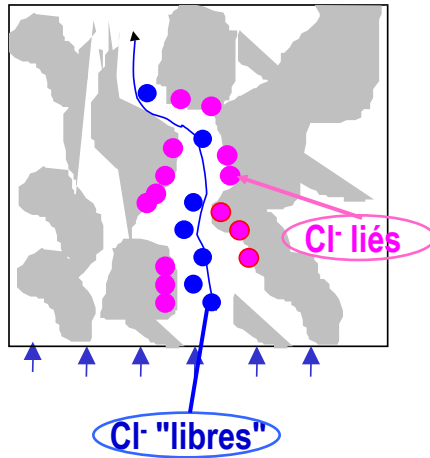
↙ **paramètre complémentaire** spécifique à la corrosion initiée par les Cl<sup>-</sup>

## 2 - ISOTHERMES D'INTERACTION Cl-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE



- **Chlorures "libres"** (solubles dans l'eau) :
  - ↳ dans la phase liquide  
(ou faiblement physisorbés sur la matrice solide)

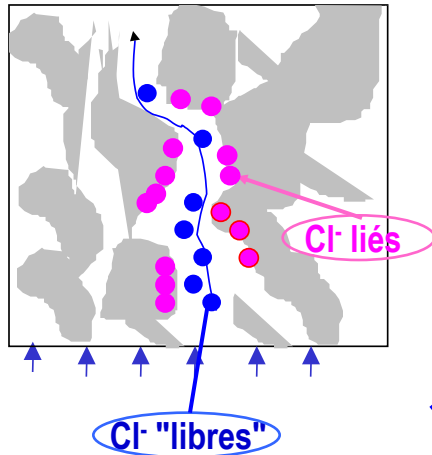
## 2 - ISOTHERMES D'INTERACTION Cl-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE



- **Chlorures "libres"** (solubles dans l'eau) :
  - ↳ dans la phase liquide  
(ou faiblement physisorbés sur la matrice solide)
- **Chlorures liés** :
  - ↳ formation de **monochloroaluminate** (sel de *Friedel*)  
(ex. : réaction chimique avec les aluminates)
  - ↳ adsorption physique sur les **C-S-H**

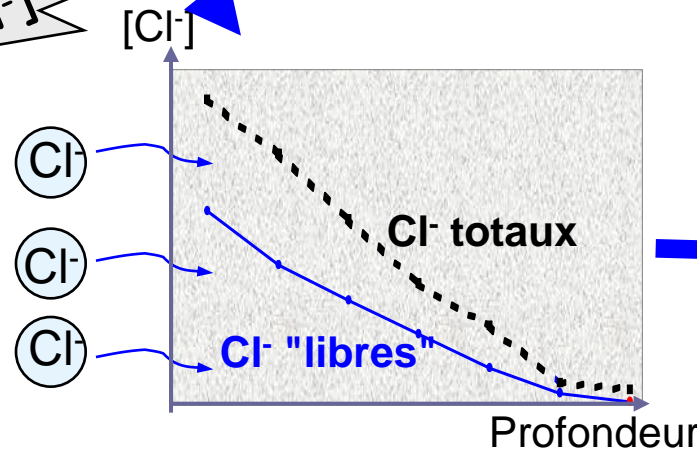
la quantité dépend du ciment (teneur en  $C_3A$ , ...)

## 2 - ISOTHERMES D'INTERACTION Cl-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE



- **Chlorures "libres"** (solubles dans l'eau) :
  - ↳ dans la phase liquide  
(ou faiblement physisorbés sur la matrice solide)
- **Chlorures liés** :
  - ↳ formation de **monochloroaluminate** (sel de *Friedel*)  
(ex. : réaction chimique avec les aluminates)
  - ↳ adsorption physique sur les **C-S-H**

Profils de  $[Cl^-]$

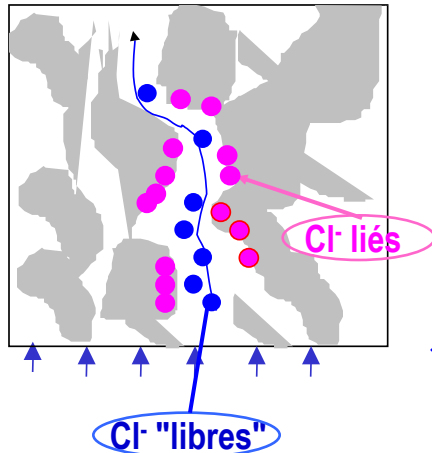


$$[Cl^- \text{ liés}] = [Cl^- \text{ tot.}] - [Cl^- \text{ "libres"}]$$

(solubles dans l'acide)

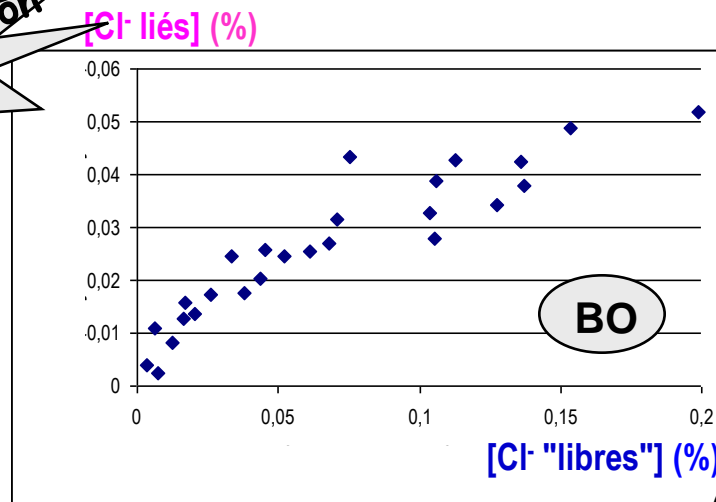


## 2 - ISOTHERMES D'INTERACTION Cl-MATRICE : DÉFINITION ET EXEMPLE



- **Chlorures "libres"** (solubles dans l'eau) :
  - ↳ dans la phase liquide  
(ou faiblement physisorbés sur la matrice solide)
- **Chlorures liés** :
  - ↳ formation de **monochloroaluminate** (sel de *Friedel*)  
(ex. : réaction chimique avec les aluminates)
  - ↳ adsorption physique sur les **C-S-H**

**Isothermes d'interaction  
Cl<sup>-</sup>-matrice**



↳ déduites des profils

(d'après [Baroghel-Bouny et al., RFGC, 2007])

## 2 - COEF. DE DIFF. DES Cl<sup>-</sup> : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.



- **Migration** en régime station

ex. [NT Build 335]

3 techniques : titrage "aval" ou "amont", conductivimétrie "aval"



- **Migration** en régime non-station.

ex. [NT Build 492, 1999]

$$\blacktriangle D_{app} + \text{capacité de fixation} + P_{eau} \blacktriangle D_{eff}$$

- **Diffusion** en régime non-station.

ex. [LPC n°58, 2002], [XP CEN/TS 12390-11, 2010]

2 méthodes : profil (prélèvements + extraction + dosage des Cl<sup>-</sup>) et colorimétrie

$$\blacktriangle D_{app} + \text{capacité de fixation} + P_{eau} \blacktriangle D_{eff}$$

- **Mesure de la résistivité électrique (r)**  $\blacktriangle D_{eff} = a / r$

ex. [norme espagnole, recom. RILEM, ...]

indicateur de substitution

↙ différentes méthodes sont à disposition

(directes ou par l'intermédiaire d'autres paramètres)

## 2 - COEF. DE DIFF. DES Cl<sup>-</sup> : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.



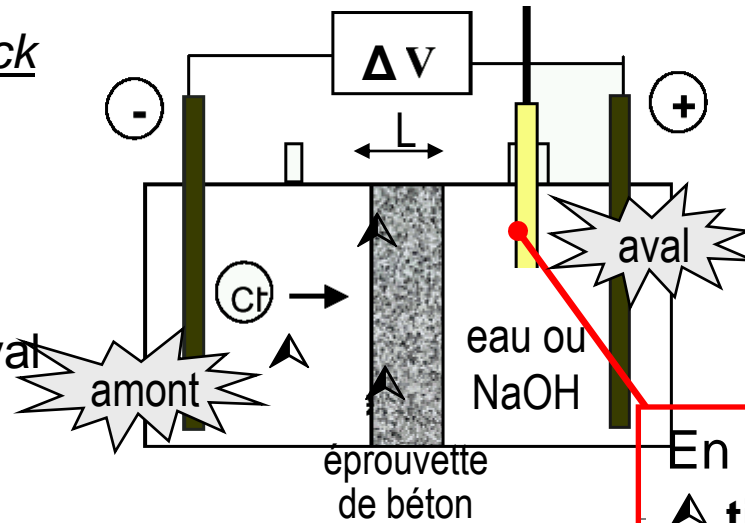
### • Essais de migration sous champ électrique •

#### Équation de Nernst-Planck

- flux de diffusion négligé

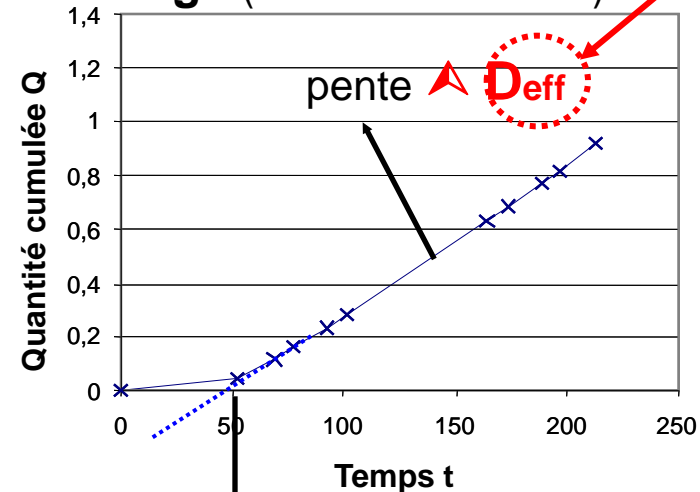
$$J = D_{\text{eff}} \cdot \left( \frac{Z \cdot F}{R \cdot T} \cdot \frac{\Delta E}{L} \cdot C \right)$$

- pas d'interaction
- titrage dans le comp. aval



En régime stationnaire :

▲ **titrage** (ou conductivimétrie)



time-lag ▲ **D<sub>app</sub>**

## 2 - COEF. DE DIFF. DES Cl<sup>-</sup> : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.



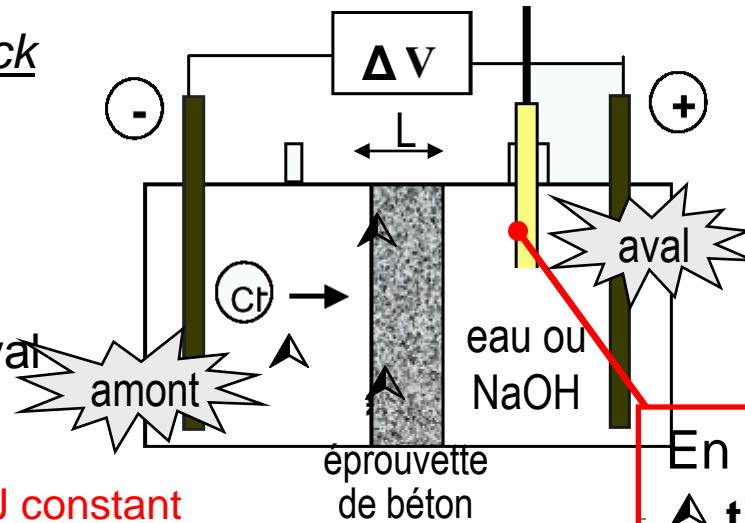
### • Essais de migration sous champ électrique •

#### Équation de Nernst-Planck

- flux de diffusion négligé

$$J = D_{\text{eff}} \cdot \left( \frac{Z.F}{R.T} \cdot \frac{\Delta E}{L} \cdot C \right)$$

- pas d'interaction
- titrage dans le comp. aval



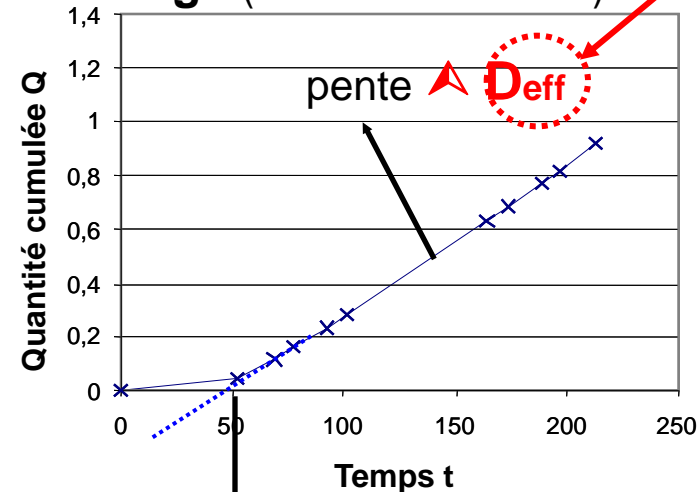
flux J constant

#### Coef. de dif. effectif des Cl<sup>-</sup> :

$$D_{\text{eff}} = \frac{R.T}{Z.F} \cdot \frac{L}{\Delta E \cdot \gamma \cdot C_{\text{amont}}} \cdot \left( \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot A} \right) \quad (\text{en } \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$$

En régime stationnaire :

▲ **titrage** (ou conductivimétrie)

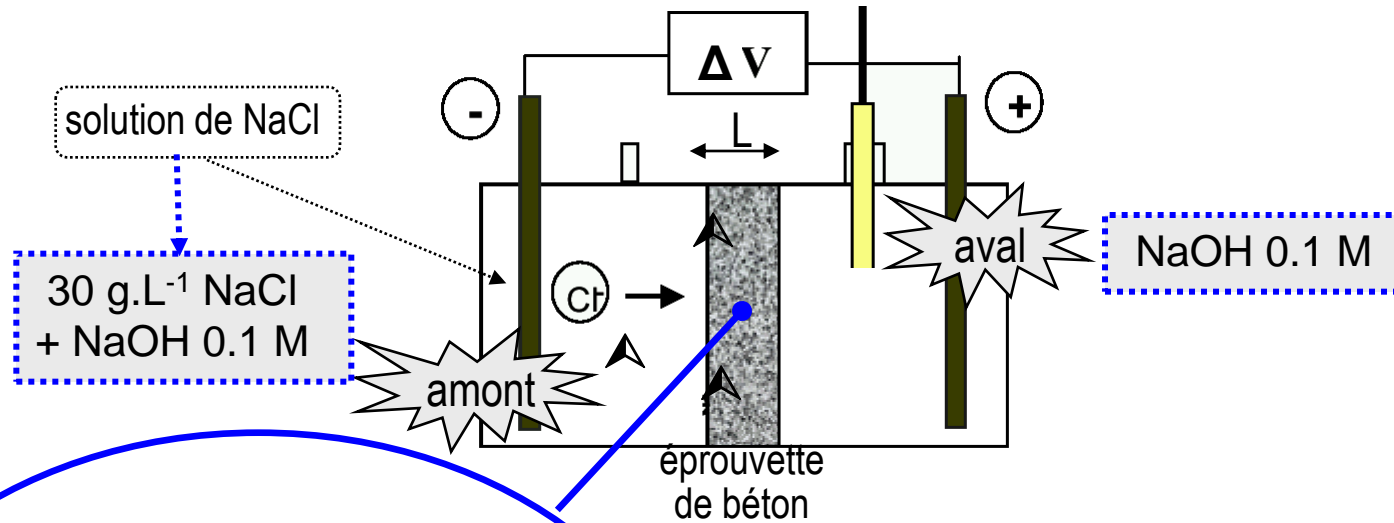


time-lag ▲ **D<sub>app</sub>**

## 2 - COEF. DE DIFF. DES Cl<sup>-</sup> : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.



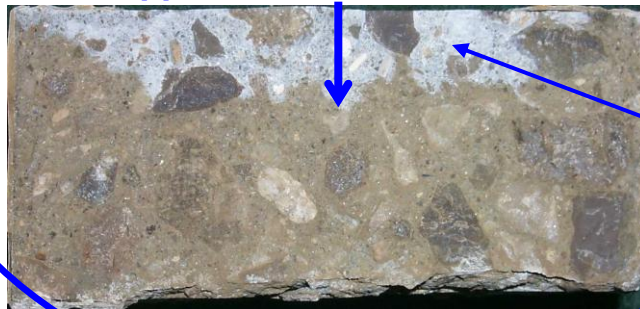
### • Essais de migration sous champ électrique •



En régime non-stationnaire :

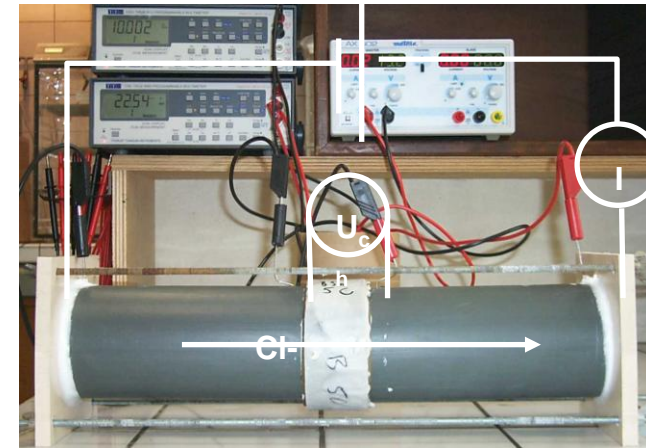
▲  $x_d$  (test colo. AgNO<sub>3</sub>)

▲  $D_{app}$   $x_d$



zone contaminée  
par les Cl<sup>-</sup>

méthode de Tang & Nilsson  
[NT Build 492, 1999]

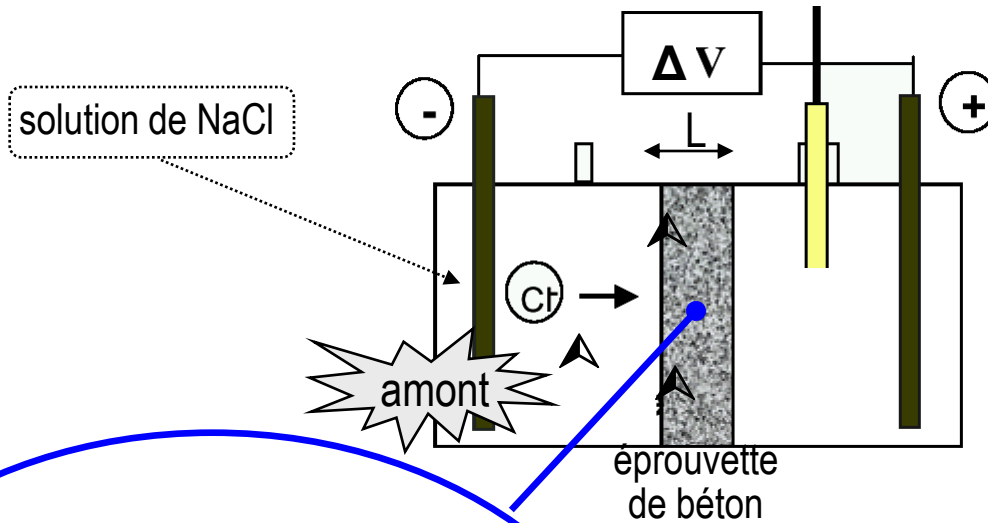


[Dispositif LCPC]

## 2 - COEF. DE DIFF. DES Cl<sup>-</sup> : MÉTHODES DE DÉTERMINATION EN COND. SAT.

✱✱✱✱✱

### • Essais de migration sous champ électrique •



flux de Cl<sup>-</sup>

Équation de *Nernst-Planck*

$$J = - D_{\text{eff}} \left( \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{Z.F}{R.T} \cdot \frac{\Delta E}{L} \cdot C \right)$$

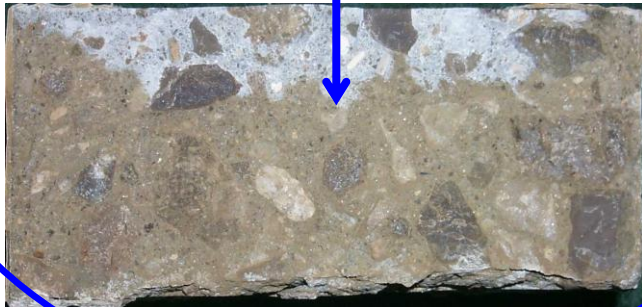
(si  $D_{\text{eff}}$  constant)

$$\frac{\partial^2 C}{\partial t^2} = D_{\text{app}} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{Z.F}{R.T} \cdot \frac{\Delta E}{L} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

En régime non-stationnaire :

▲  $x_d$  (test colo. AgNO<sub>3</sub>)

▲  $D_{\text{app}}$   $x_d$



Coef. de dif. apparent des Cl<sup>-</sup> (en m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) :

$$D_{\text{app}} = \frac{R.T}{Z.F} \cdot \frac{L}{\Delta E} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t}$$

[Tang & Nilsson, 1992]

avec

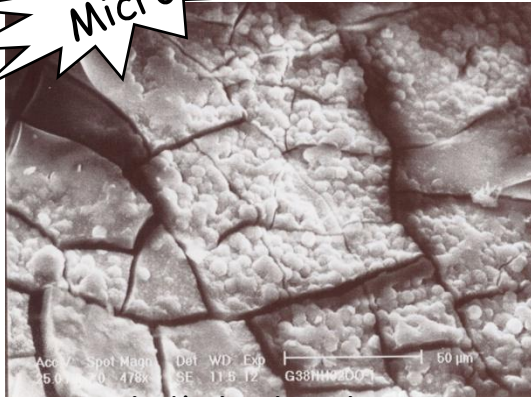
- $x_d$  : profondeur moy. de pénétration des Cl<sup>-</sup>
- $t$  : durée de l'essai
- $Z$  : valence de l'ion Cl<sup>-</sup>
- $\Delta E$  : dif. de pot. réelle aux bornes de l'épr.
- $\alpha$  : terme auxiliaire

## 2 - ALCALI-RÉACTION : IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES PERTINENTS

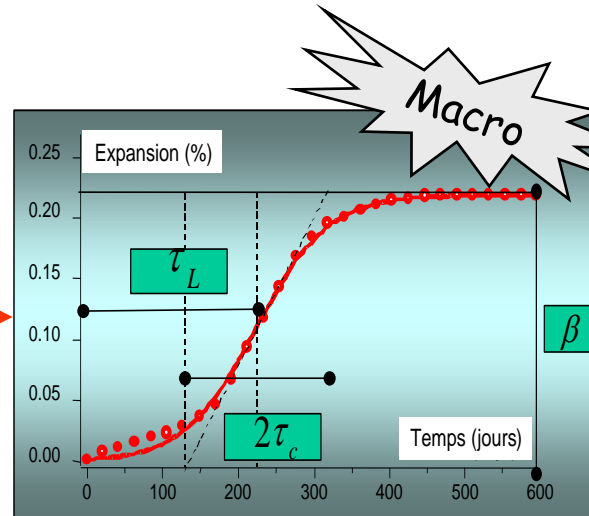


- Alcali-réaction : phénomène multi-échelles ●

Micro



Gel d'alcali-réaction observé au MEB



Gonflement d'éprouvettes de béton en conditions de laboratoire

[LCPC, 2003]

$\tau_L$  : temps de latence

$\tau_c$  : temps caractéristique

$\beta$  : amplitude max. de gonflement



Macro



Dégradations observées (barrages, ponts, routes)

⚡ En dépit de mécanismes non complètement élucidés ⚡ **identification de paramètres pertinents** (sur la base d'études en labo.) pour une nouvelle approche de la durabilité vis-à-vis de l'alcali-réaction



## 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION



### ☆ Indicateurs chimiques (relatifs aux constituants)

- quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps





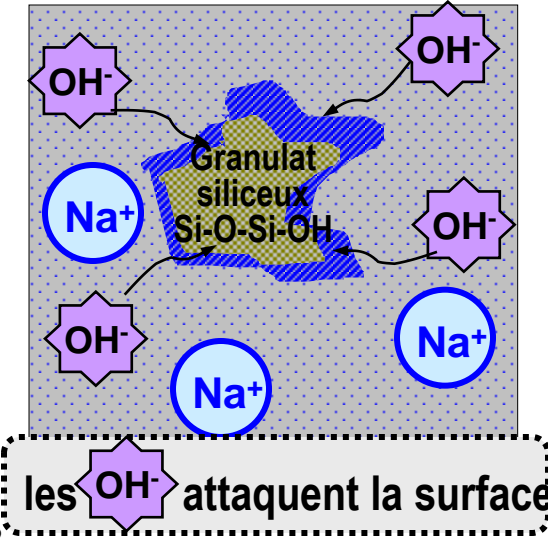
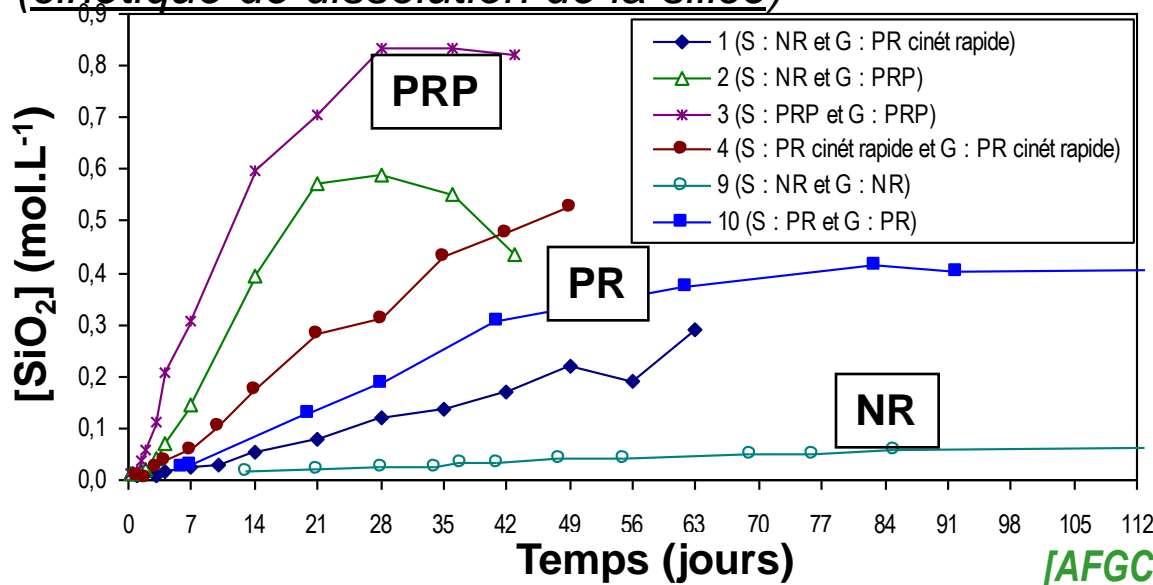
# 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION



↳ Exemples : résultats exp. obtenus en labo. (groupe AFGC)

## ☆ Indicateurs chimiques (relatifs aux constituants)

- **quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps**  
(cinétique de dissolution de la silice)



[AFGC, 2004]

↳ évaluation de la réactivité des granulats ou des mélanges granulaires sans add.

**NR** : non réactif

**PR** : potentiellement réactif

**PRP** : potentiellement réactif à effet de pessimum

## 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION



### ☆ Indicateurs chimiques (relatifs aux constituants)

- **quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps**

*(cinétique de dissolution de la silice)*

↳ évaluation de la réactivité des mélanges granulaires sans addition  
**(PRP, PR et NR)**

- **concentration en alcalins équivalents  $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$ . actifs de la solution interstitielle**

*(bilan des alcalins contenus dans [ciment + granulats + additions min.] par analyse chimique)*



## 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION



### ☆ Indicateurs chimiques (relatifs aux constituants)

- **quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps**

*(cinétique de dissolution de la silice)*

↳ évaluation de la réactivité des mélanges granulaires sans addition  
**(PRP, PR et NR)**



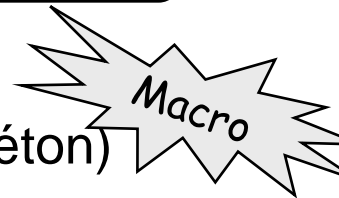
- **concentration en alcalins équivalents  $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$ . actifs de la solution interstitielle**

*(bilan des alcalins contenus dans [ciment + granulats + additions min.] par analyse chimique)*

### ☆ Indicateur physique global (mesuré sur éprouvettes en béton)

- **déformations de gonflement (expansion) en fonction du temps**

*(cinétique d'expansion longitudinale de bétons dopés en alcalins)*  
jusqu'à l'échéance de **3 mois** (ou éventuellement 5 ou 12 mois)



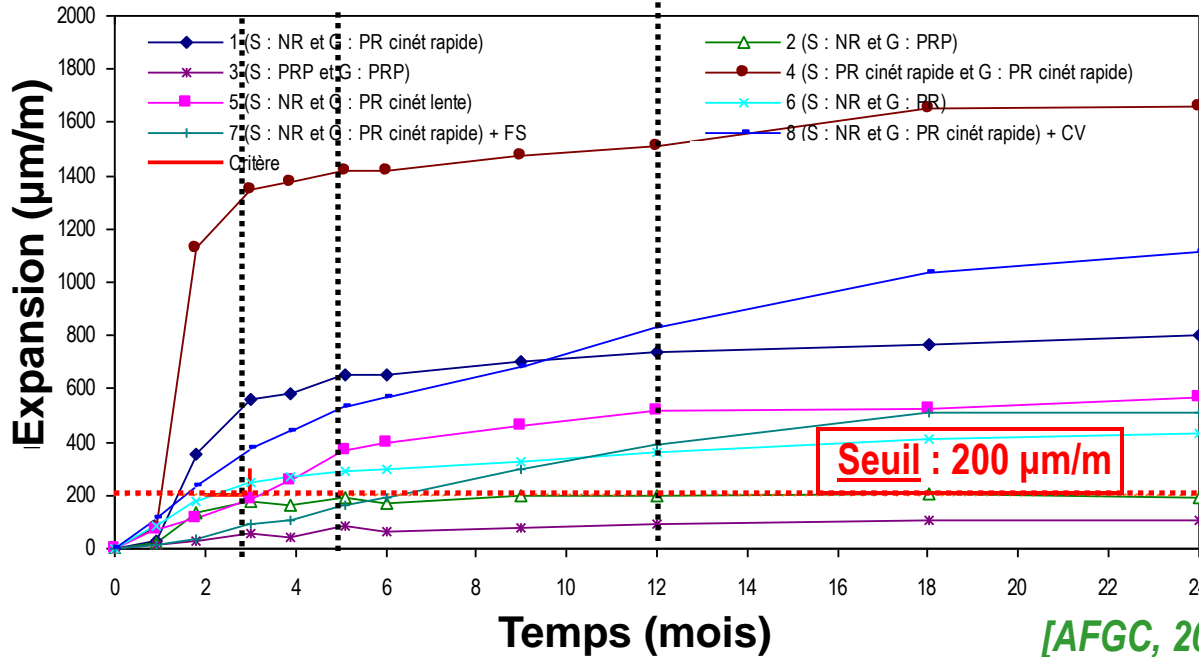
# 2 - INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUES À L'ALCALI-RÉACTION



↳ Exemples : résultats exp. obtenus en labo. (groupe AFGC)

☆ Indicateur physique global (mesuré sur éprouvettes en béton)

● **déformations de gonflement (expansion) en fonction du temps**



dopage :  
 $Na_2O_{eq} = 1,25\%$   
 (par rapport à la masse de C+A)


effet des FS



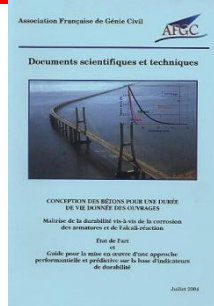
(T=60°C - HR=100%)

[AFGC, 2004]

# Plan

- 1 - Introduction : nouvelle approche de la durabilité
- 2 - Indicateurs de durabilité : caractéristiques et pertinence
-  3 - Classes associées aux indicateurs de durabilité
- 4 - Spécifications performantielles, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée
- 5 - Prédiction de la durée de vie des structures : témoins de durée de vie et modélisation "multi-niveaux"
- 6 - Conclusion : boîte à outils pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité

# 3 - CLASSES ASSOCIÉES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX (PRÉVENTION DE LA CORROSION DES ARMATURES)



[AFGC, 2004]

Durabilité "potentielle" → Indicateur général ↓	Très faible (TF)	Faible (F)	Moyenne (M)	Elevée (E)	Très élevée (TE)
Porosité accessible à l'eau $P_{\text{eau}}$ (%)	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coef. de diffusion "effectif" des Cl <sup>-</sup> $D_{\text{eff}}$ ( $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
Coef. de diffusion "apparent" des Cl <sup>-</sup> (mesuré par essai de migration) $D_{\text{app(mig)}}$ ( $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
Coef. de diffusion "apparent" des Cl <sup>-</sup> (mesuré par essai de diffusion ns) $D_{\text{app(dif)}}$ ( $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )				< 5	
Perméabilité "apparente" aux gaz $K_{\text{app(gaz)}}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ ) (à S=0)	> 1000	300 à 1000	100 à 300	30 à 100	< 30
Perméabilité intrinsèque à l'eau liq. $K_{\text{liq}}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ ) (à S=1)	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
Teneur en Ca(OH) <sub>2</sub> (% par rapport à la masse de ciment)	< 10	10 à 13	13 à 20	20 à 25	≥ 25

Coef. de diffusion des Cl<sup>-</sup>

[valeurs moy. indicatives - Mesures sur éprouv. conservées préalablement dans l'eau (âge ≤ 90 j)]

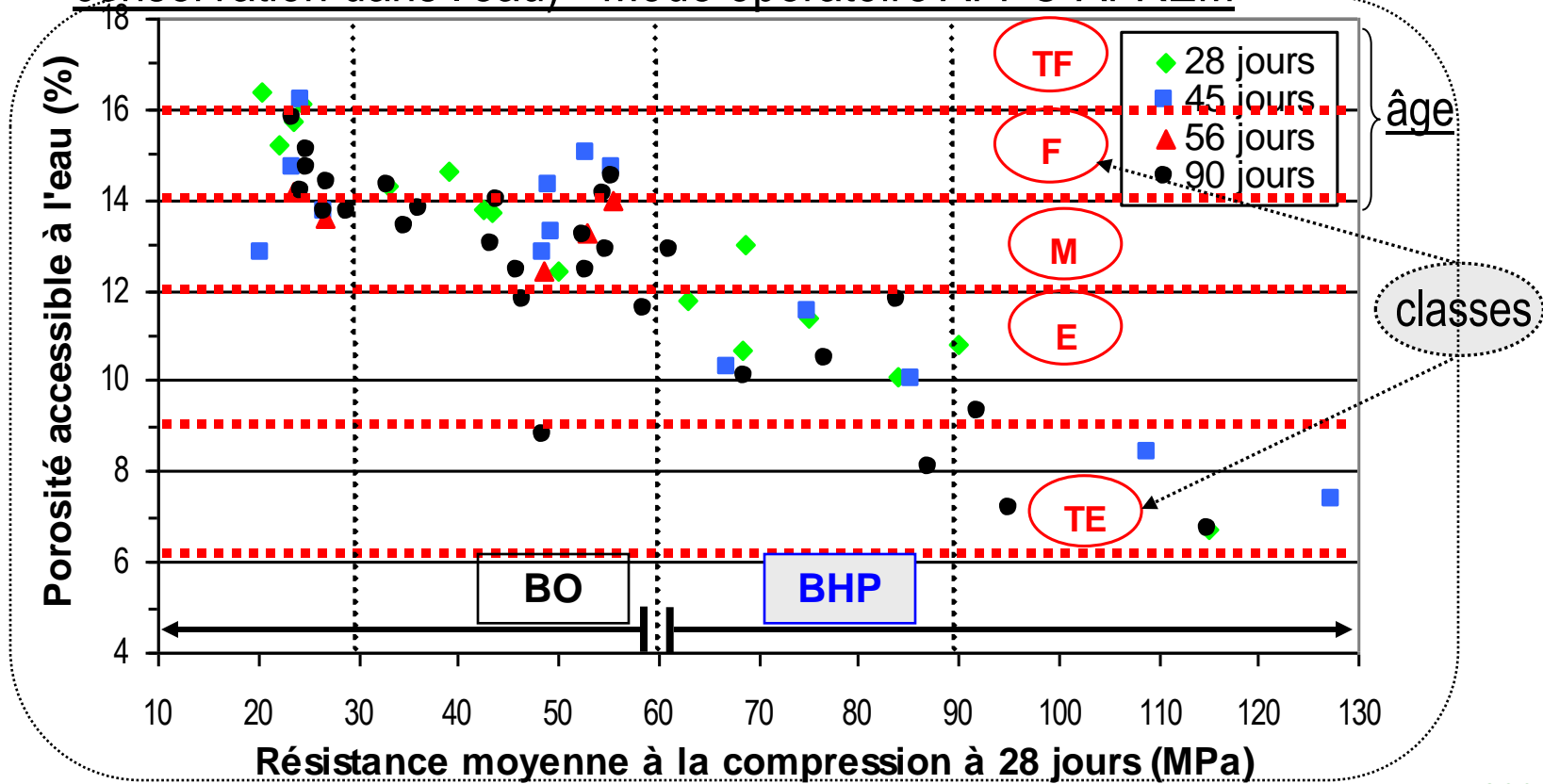
## → Évaluation de la durabilité "potentielle" d'un béton armé donné

- ① selon chaque indicateur déterminé
- ② sur la base d'une appréciation globale

# 3 - POROSITÉ ACCESSIBLE A L'EAU



- Résultats obtenus par pesée hydrostatique sur éprouvettes de bétons (après conservation dans l'eau) - Mode opératoire AFPC-AFREM ●



→ Corrélation entre porosité et résistance : [Baroghel-Bouny, TI, 2005]

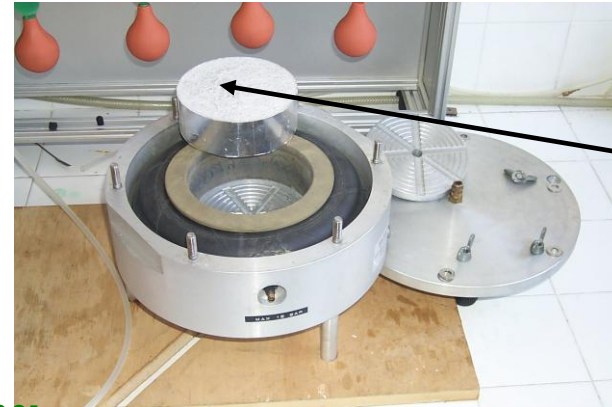
$P_{\text{eau}}$  ↘ des B20 aux **BHP avec FS tels que  $R_{\text{moy.28}} > 90 \text{ MPa}$  ( $P_{\text{eau}} < 10\%$ )**

→ **BHP ↗ durabilité "potentielle" élevée ou très élevée**

### 3 - PERMÉABILITÉ AUX GAZ : MÉTHODE DE DÉTERMINATION



- Dispositif à charge constante (CEMBUREAU) - Mode opératoire AFPC-AFREM ●



épreuve en béton

[LPC n° 58, 2002]

- ▲ Épreuve soumise à une pression d'entrée P constante de gaz (après séchage)
- ▲ **Perméabilité aux gaz "apparente"  $K_{app(gaz)}$**  à partir de la mesure du débit de gaz Q (en  $m^3.s^{-1}$ ) sortant en régime permanent et des caractéristiques de l'épr. et de l'essai :

à  $S = 0$

$$K_{app(gaz)} = \frac{2 \cdot Q \cdot P_{atm} \cdot L \cdot \eta_{gaz}}{A \cdot (P^2 - P_{atm}^2)}$$

(en  $m^2$ )

→ dépend de  $P_{moy}$

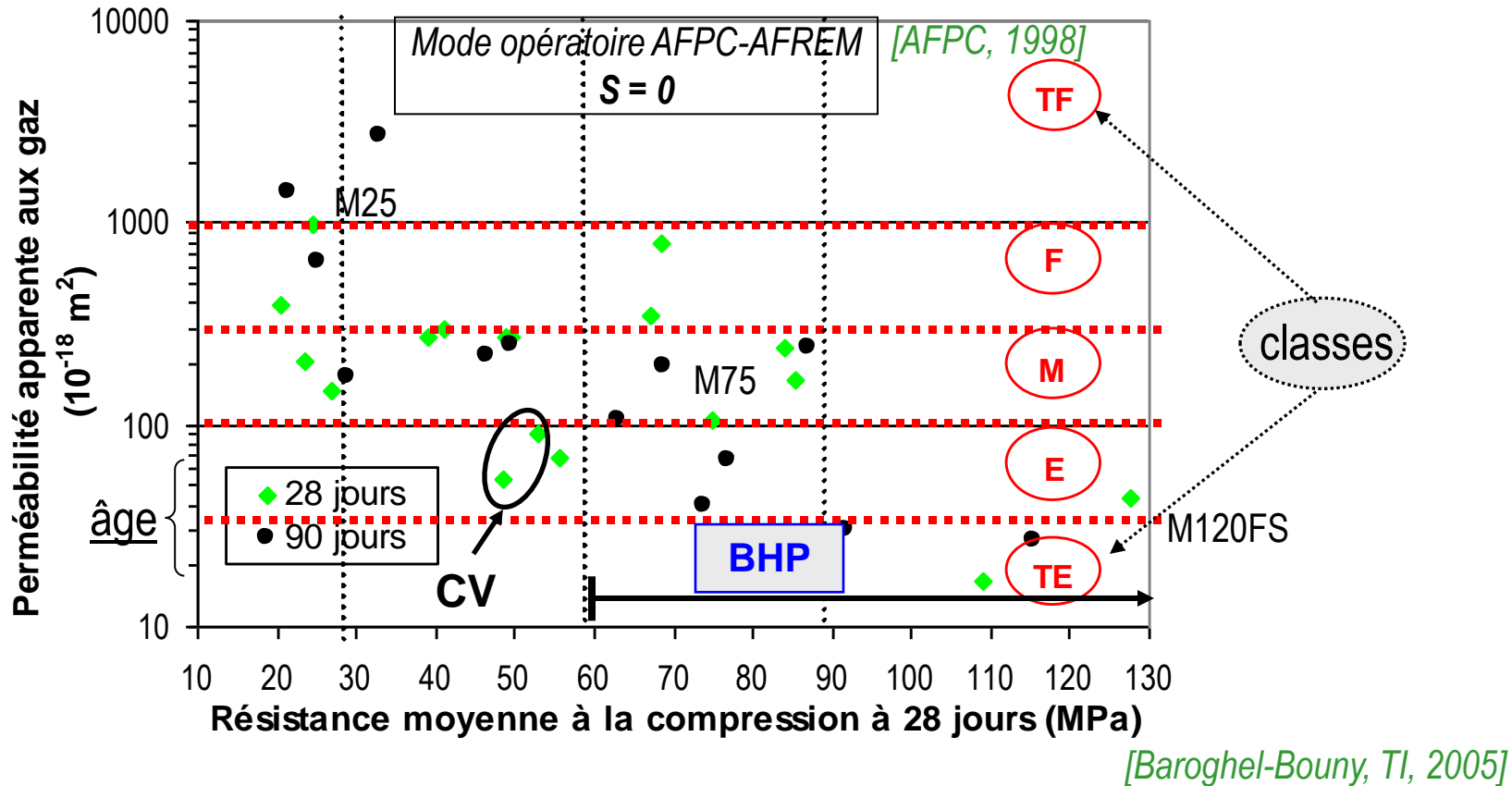
- L : épaisseur de l'épreuve (m)
- A : section de l'épreuve ( $m^2$ )
- $\eta_{gaz}$  : viscosité dynamique du gaz (Pa.s)
- $P_{atm}$  : pression atmosphérique (Pa)
- P : pression d'entrée appliquée (Pa) [par ex.  $P = 0,2 \text{ MPa}$ ]



### 3 - EXEMPLE : PERMÉABILITÉ AUX GAZ "APPARENTE"



- Résultats sur **bétons** après conservation dans l'eau et étuvage à  $T=105\pm 5^\circ\text{C}$  ●

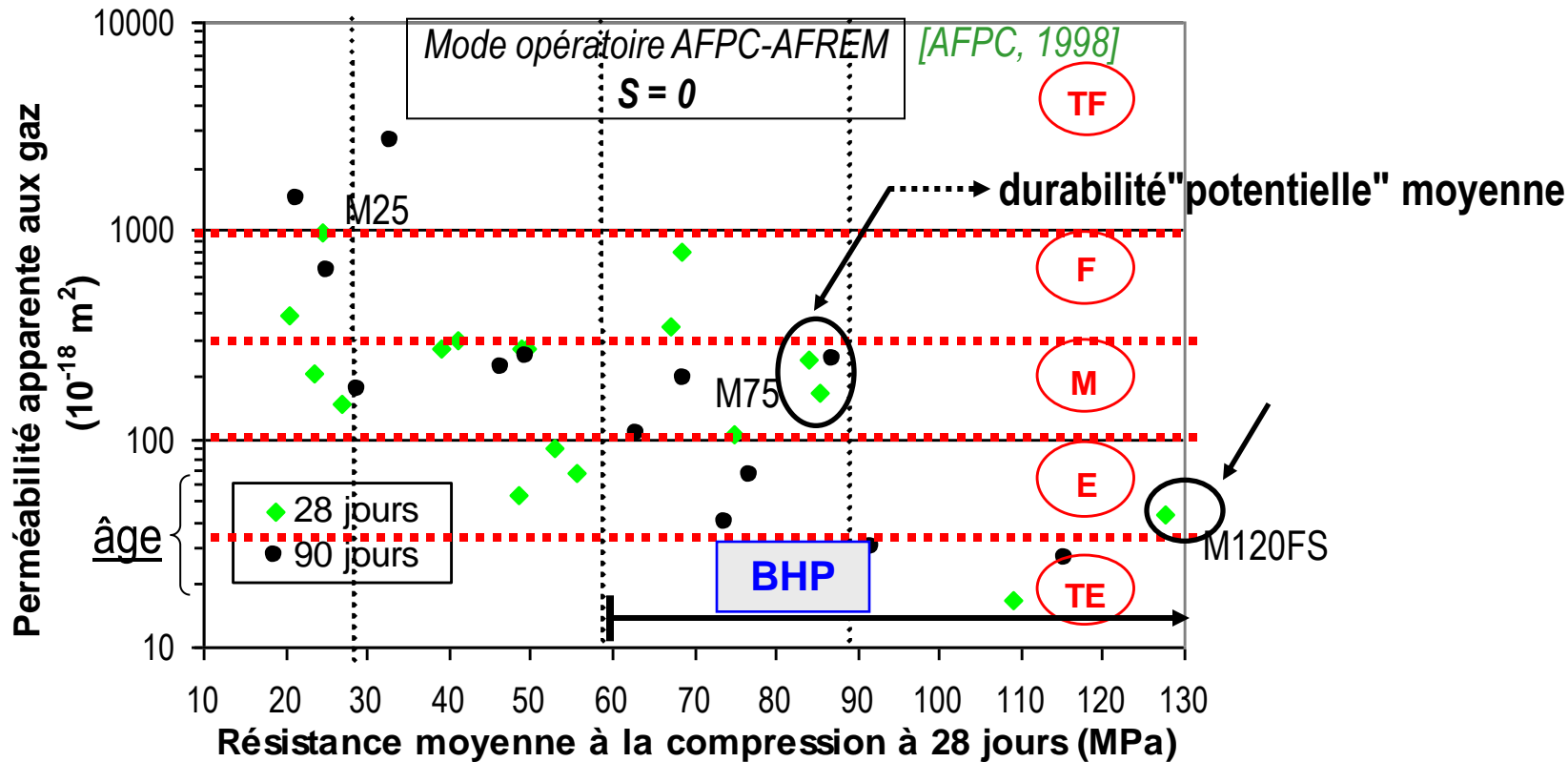


$K_{\text{app(gaz)}}$  (à  $S=0$ )  $\searrow$  (de plusieurs ordres de grandeur) des bétons bas de gamme (20-25 MPa) aux **BHP avec FS**

### 3 - EXEMPLE : PERMÉABILITÉ AUX GAZ "APPARENTE"



- Résultats sur bétons après conservation dans l'eau et étuvage à T=105±5°C ●



... mais dispersion des résultats :

[Baroghel-Bouny, TI, 2005]

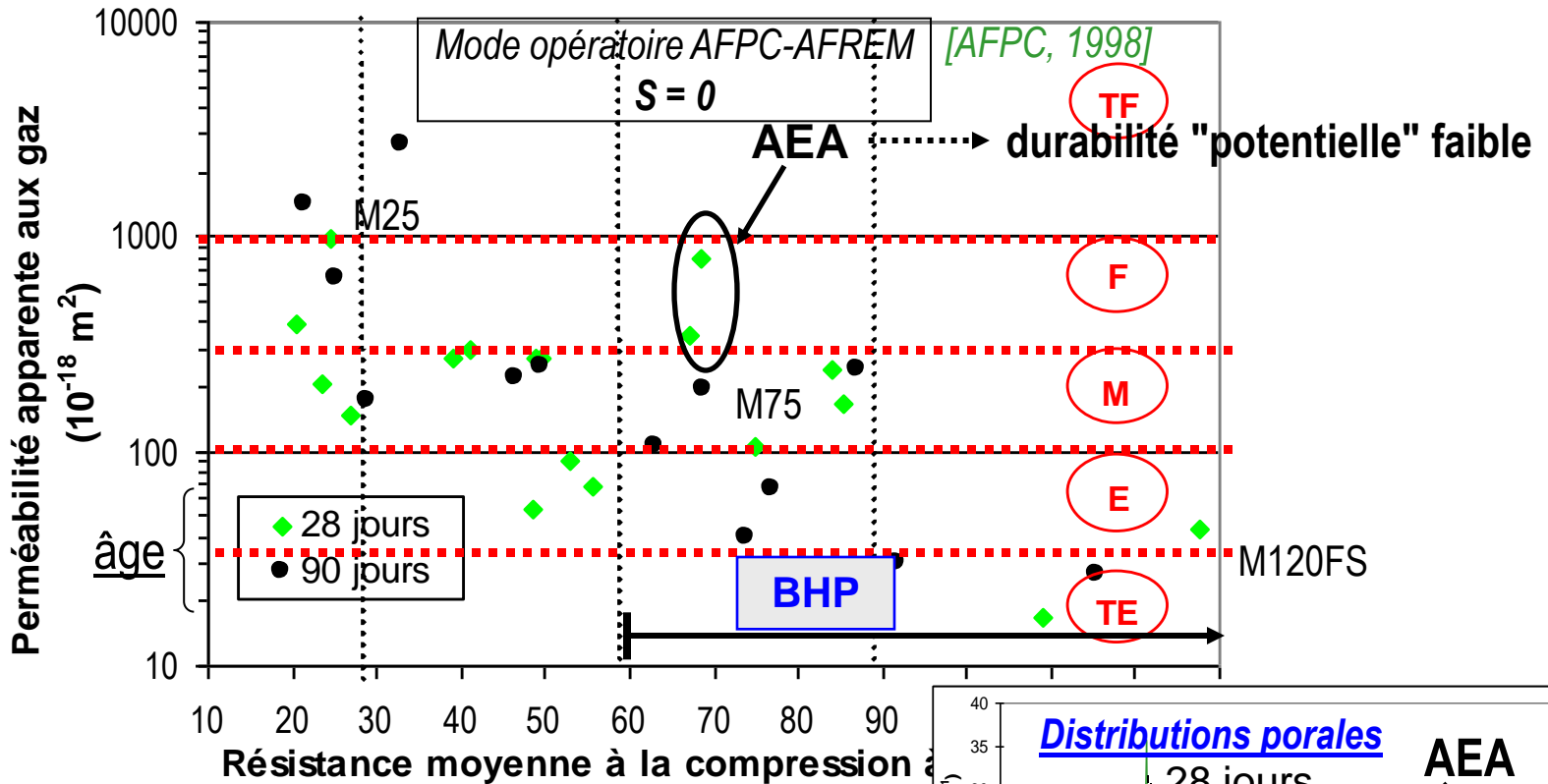
influence négative sur les **BHP** de

- **microfissuration** (mais ne semble pas amplifiée par le préconditionnement)

# 3 - EXEMPLE : PERMÉABILITÉ AUX GAZ "APPARENTE"



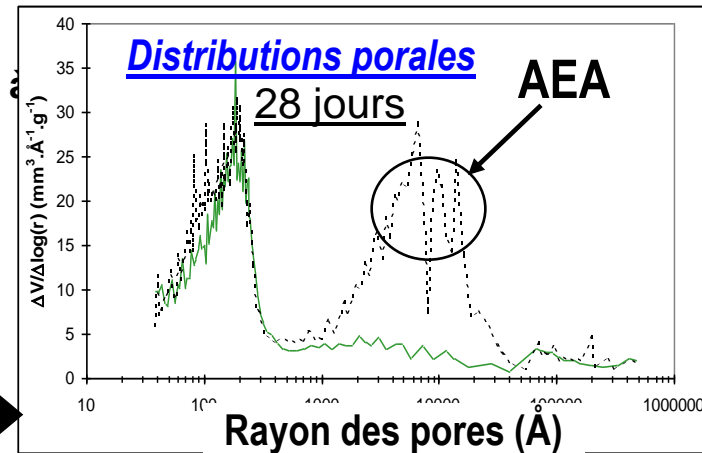
- Résultats sur **bétons** après conservation dans l'eau et étuvage à  $T=105\pm 5^\circ\text{C}$  ●



➔ ... mais dispersion des résultats :

influence négative sur les **BHP** de

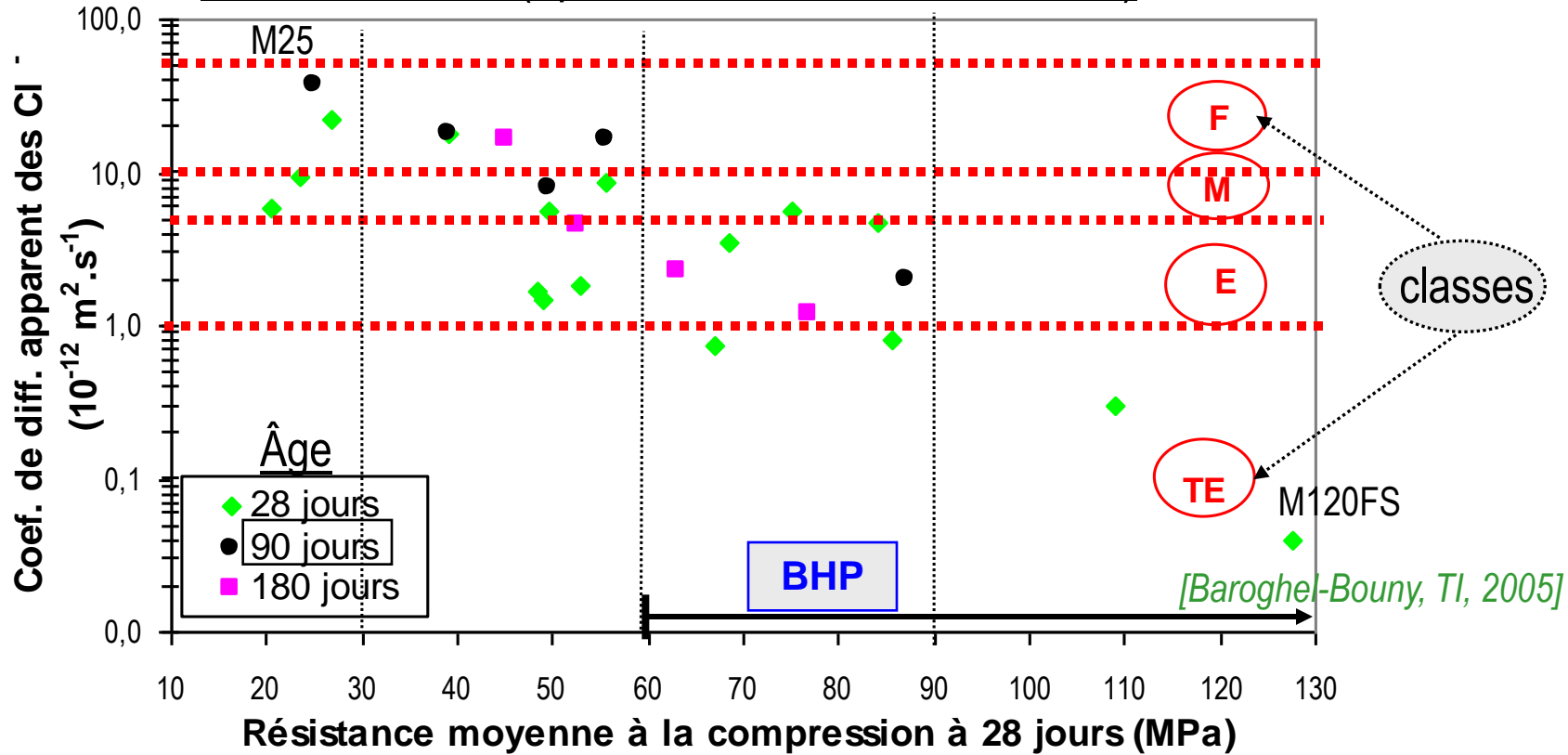
- microfissuration (mais ne semble pas amplifiée par le préconditionnement)
- présence d'**AEA** ➔ connectivité du réseau des vides



### 3 - EXEMPLE : COEFFICIENT DE DIFFUSION "APPARENT" DES Cl-



- Résultats obtenus par essai de migration en régime non-stationnaire sur des bétons saturés (après conservation dans l'eau) •

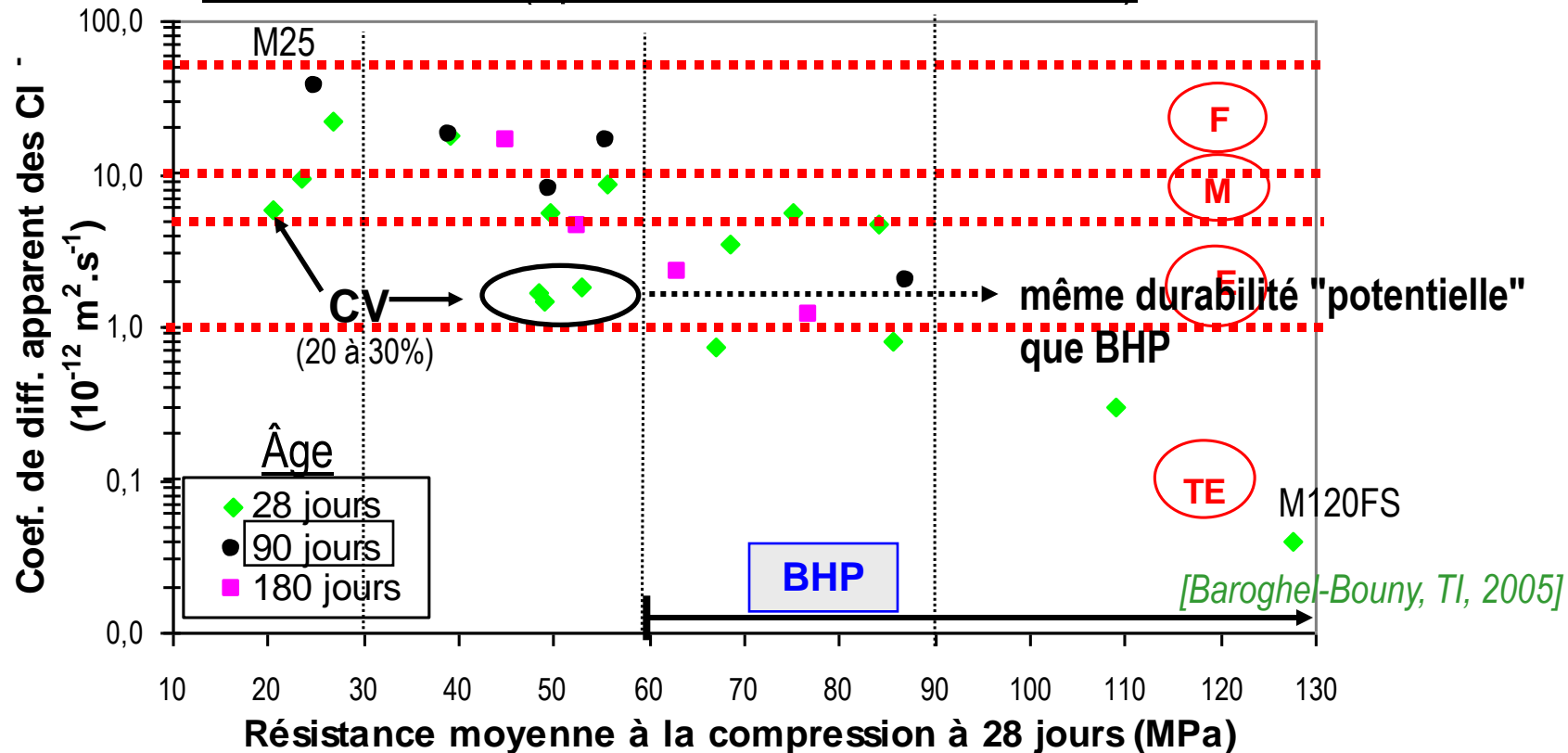


- ➔  $D_{ns(mig)}$  ↘ (2 ordres de grandeur) entre bétons bas de gamme (20-25 MPa) et **BHP avec FS** ➔ **BHP** ⤴ **durabilité "potentielle" élevée ou très élevée**
- ➔ mais déviation par rapport à une relation simple entre  $D_{ns(mig)}$  et

### 3 - EXEMPLE : COEFFICIENT DE DIFFUSION "APPARENT" DES Cl-



- Résultats obtenus par essai de migration en régime non-stationnaire sur des bétons saturés (après conservation dans l'eau) ●



↙ La résistance mécanique est insuffisante pour évaluer la durabilité "potentielle" d'un BA (notamment avec additions pouzzo.) et pour qualifier une formule

➔ **pertinence d'une approche performantielle et des ID choisis**

### 3 - DURABILITÉ "POTENTIELLE" SUR LA BASE D'INDICATEURS (MESURÉS À 28 JOURS)

Bétons (classés selon $R_{moy,28}$ )	E/C	E/liant	$R_{moy,28}$ (MPa)	$P_{eau}$ OU $P_{Hg}$ (%)	$K_{app(gaz)}$ ( $S = 0$ ) ( $10^{-18} m^2$ )	$D_{ns(mig)}$ OU $D_{ns(dif)}^{(*)}$ ( $10^{-12} m^2 \cdot s^{-1}$ )	Durabilité "potentielle" globale <sup>(1)</sup>
M25CVEA	0,84	0,67	20,5	16,4	390	5,8	F
M25CV	0,96	0,77	23,5	15,7	206	9,5	M
M25	0,84	0,84	24,5	16,1	978	30,0	F
M25EA	0,70	0,70	26,8	13,7	148	22,4	M
B30	0,43	0,43	39,0	10,7( $H_q$ )	270	17,5	M
<i>B32</i>	<i>0,44</i>	<i>0,44</i>	<i>46,5</i>	<i>11,8</i>	<i>217</i>	<i>8,6<sup>(*)</sup></i>	M
M30CV	0,74	0,52	48,5	12,8	54	1,7	E
M50CVEA	0,45	0,36	49,0	14,3	271	1,5	M
M50EA	0,39	0,39	49,5	13,3	272	5,5	M
M50CV	0,56	0,45	53,0	15,0	89	1,8	M
M50	0,48	0,48	55,5	14,7	69	8,7	M
M75FSEA	0,34	0,32	67,0	10,3	347	0,7	M
M75EA	0,27	0,27	68,5	10,7	782	3,5	M
<i>B60</i>	<i>0,34</i>	<i>0,34</i>	<i>68,8</i>	<i>10,1</i>	<i>196</i>	<i>1,2<sup>(*)</sup></i>	E
M75	0,32	0,32	75,0	11,4	106	5,6	M
B70FS	0,37	0,35	84,0	7,6( $H_q$ )	240	4,8	E
M75FS	0,38	0,36	85,5	10,0	167	0,8	E
<i>B80FS</i>	<i>0,30</i>	<i>0,28</i>	<i>91,9</i>	<i>9,3</i>	<i>30</i>	<i>0,7<sup>(*)</sup></i>	E
M100FS	0,33	0,30	109,0	8,4	17	0,3	TE
M120FS	0,26	0,23	127,5	7,4	43	0,04	TE

$R_{moy,28}$  croissante

30% CV


BHP

(1): pondération identique pour chaque indicateur

[Baroghel-Bouny, OA 44, 2004]

➔ BHP (avec FS et sans AEA) ▲ durabilité "potentielle" élevée ou très élevée

# Plan

- 1 - Introduction : nouvelle approche de la durabilité
- 2 - Indicateurs de durabilité : caractéristiques et pertinence
- 3 - Classes associées aux indicateurs de durabilité
-  4 - Spécifications performantielles, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée
- 5 - Prédiction de la durée de vie des structures : témoins de durée de vie et modélisation "multi-niveaux"
- 6 - Conclusion : boîte à outils pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité

# 4 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ EN FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE

**Nouveau!**



• Exemple 1 : protection contre la corrosion initiée par les Cl<sup>-</sup> (enrobage = 50 mm) •

Type d'environnement → Durée de vie exigée / Niveau d'exigence ↓	5 (exposition aux sels marins)		6 (immersion dans l'eau de mer)	7 (zone de marnage)
	5.1	5.2		
<b>&lt; 30 ans</b> Niveau 1	•P <sub>eau</sub> < 16	•P <sub>eau</sub> < 14	•P <sub>eau</sub> < 15	•P <sub>eau</sub> < 14
<b>de 30 à 50 ans</b> Niveau 2	•P <sub>eau</sub> < 15	•P <sub>eau</sub> < 11	•P <sub>eau</sub> < 13	•P <sub>eau</sub> < 11
<b>de 50 à 100 ans</b> Niveau 3	•P <sub>eau</sub> < 14	•P <sub>eau</sub> < 11 •D <sub>app(mig)</sub> < 2 •K <sub>liq</sub> < 0,1	•P <sub>eau</sub> < 13 •D <sub>app(mig)</sub> < 7	•P <sub>eau</sub> < 11 •D <sub>app(mig)</sub> < 3 •K <sub>liq</sub> < 0,1
<b>de 100 à 120 ans</b> Niveau 4	•P <sub>eau</sub> < 12 •D <sub>app(mig)</sub> < 20 •k <sub>liq</sub> < 0,1	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 1 •K <sub>app(gaz)</sub> < 30 •K <sub>liq</sub> < 0,01	•P <sub>eau</sub> < 12 •D <sub>app(mig)</sub> < 5	•P <sub>eau</sub> < 10 •D <sub>app(mig)</sub> < 2 •K <sub>app(gaz)</sub> < 100 •K <sub>liq</sub> < 0,05
<b>&gt; 120 ans</b> Niveau 5	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 10 •K <sub>app(gaz)</sub> < 30 •k <sub>liq</sub> < 0,01	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 1 •K <sub>app(gaz)</sub> < 30 •k <sub>liq</sub> < 0,01	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 1	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 1 •K <sub>app(gaz)</sub> < 30 •k <sub>liq</sub> < 0,01

avec l'écart-type adéquat

[Baroghel-Bouny, 71, 2005]

↳ cahiers des charges, recommandations, règlements, normes, ...

➔ Sélection ou qualification de formules de béton pour une structure donnée



# 4 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ EN FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE



## • Exemple 2 : prévention vis-à-vis de l'alcali-réaction • (1)

Sur la base des niveaux de prévention **A**, **B** et **C** définis dans *Recommandations [LCPC, 1994]*

Type d'environnement → Durée de vie exigée / Niveau d'exigence ↓	1 (sec ou modérément humide)	2 (cycles d'humid.- séchage)	3 (immersion ou présence de sels)
de 5 à 50 ans  Niveau 1	A	A	A
de 50 à 100 ans  Niveau 2	A	<b>B</b>	<b>B</b>
> 120 ans  Niveau 3	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>

- **A** ▲ aucune spécification (supplémentaire aux *Recommandations [LCPC, 1994]*)
- **B et C** ▲ spécifications relatives aux indicateurs spécifiques à l'alcali-réaction ...

# 4 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ EN FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE



✧✧✧✧✧

• Exemple 2 : prévention vis-à-vis de l'**alcali-réaction** • (2)

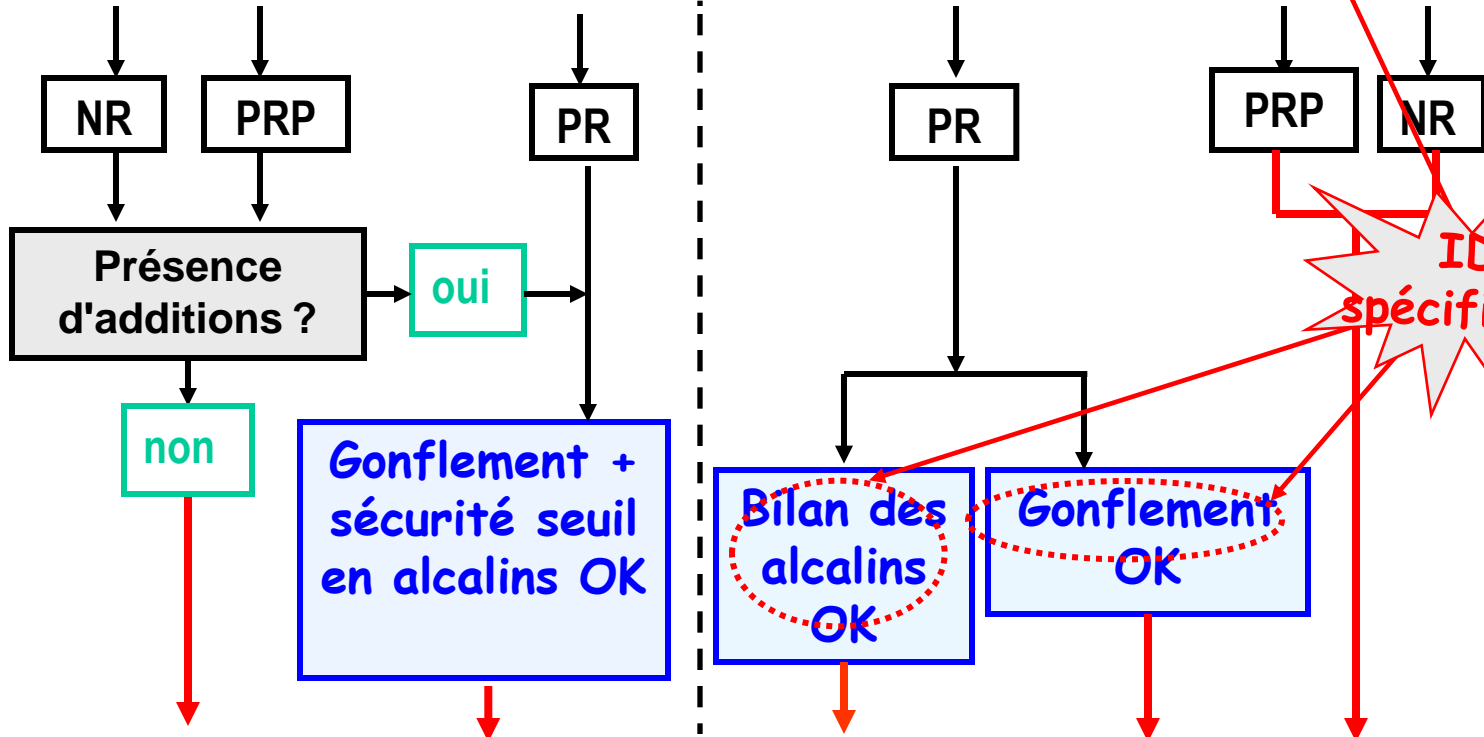
Niveau 3 (> 120 ans) (C)

(C)

Niveau 2 (de 50 à 100 ans) +


B

Quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps ?



La formule de béton est acceptée

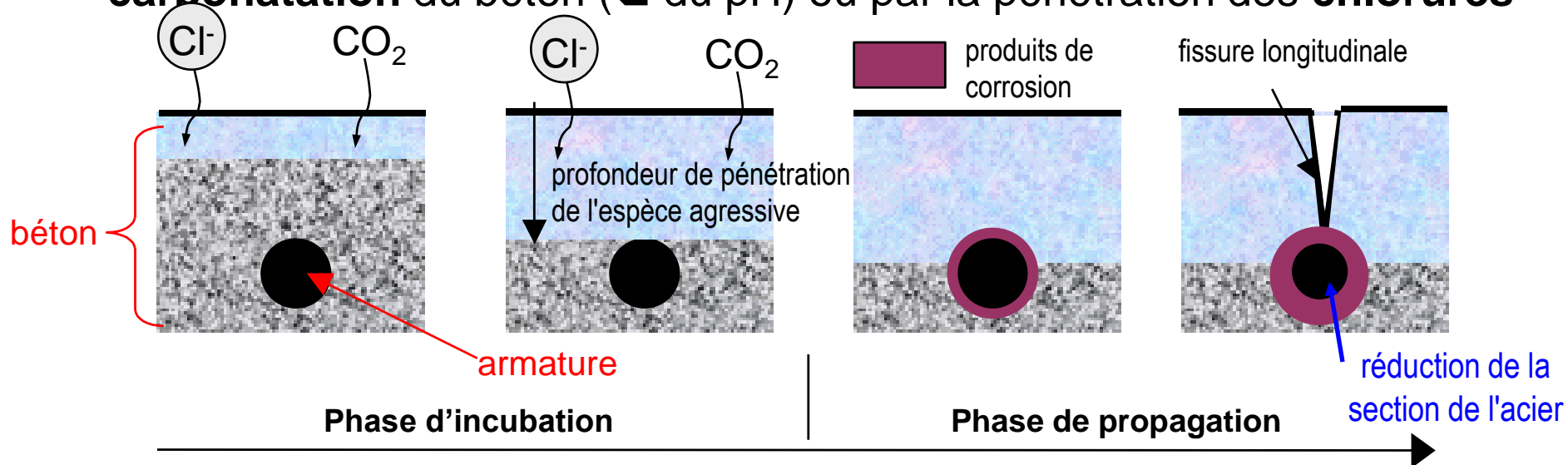
# Plan

- 1 - Introduction : nouvelle approche de la durabilité
- 2 - Indicateurs de durabilité : caractéristiques et pertinence
- 3 - Classes associées aux indicateurs de durabilité
- 4 - Spécifications performantielles, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée
-  5 - *Prédiction de la durée de vie des structures : témoins de durée de vie et modélisation "multi-niveaux"*
- 6 - Conclusion : boîte à outils pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité

# 5 - LA CORROSION DES ARMATURES DU BÉTON ARMÉ



- ✘ La corrosion des armatures du béton armé peut être initiée par la **carbonatation** du béton (↘ du pH) ou par la pénétration des **chlorures**



→ pénétration d'espèces agressives

→ les espèces agressives ont atteint les aciers

→ amorçage et propagation de la corrosion

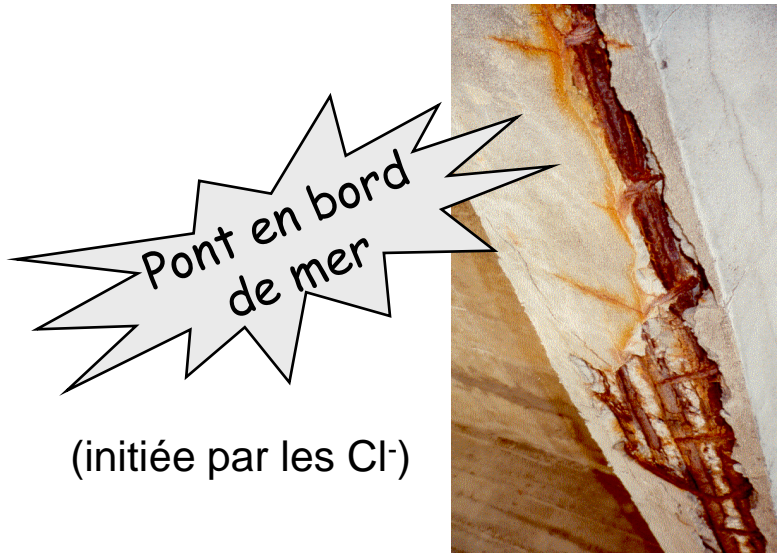
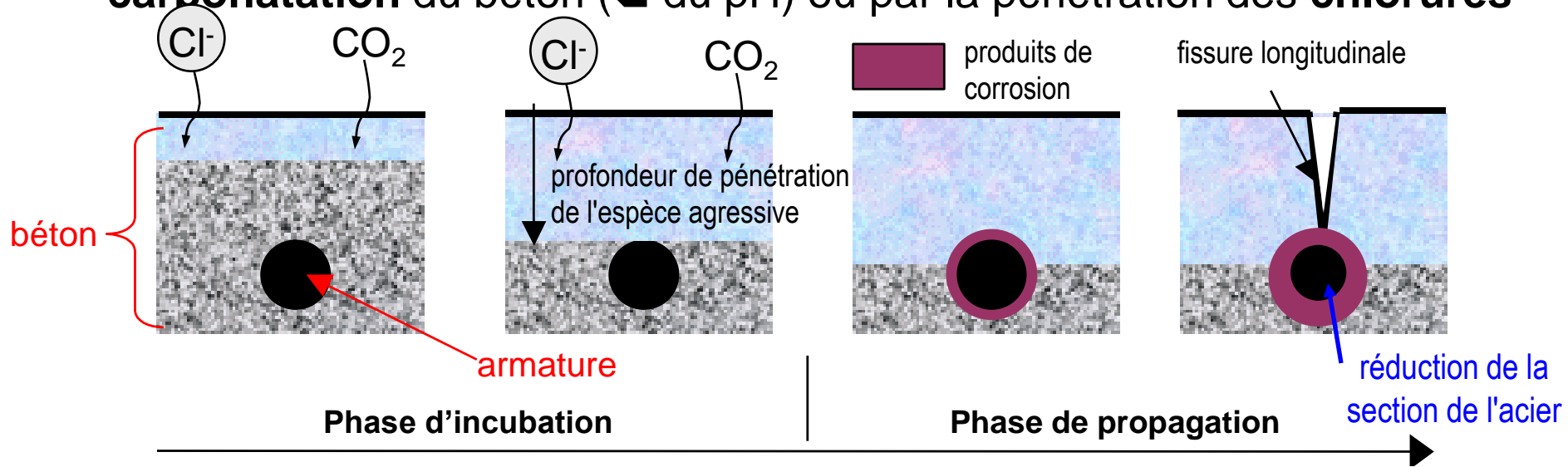
→ structure dégradée

(fissuration béton, réduction section acier)

# 5 - LA CORROSION DES ARMATURES DU BÉTON ARMÉ



- ✘ La corrosion des armatures du béton armé peut être initiée par la **carbonatation** du béton (↘ du pH) ou par la pénétration des **chlorures**



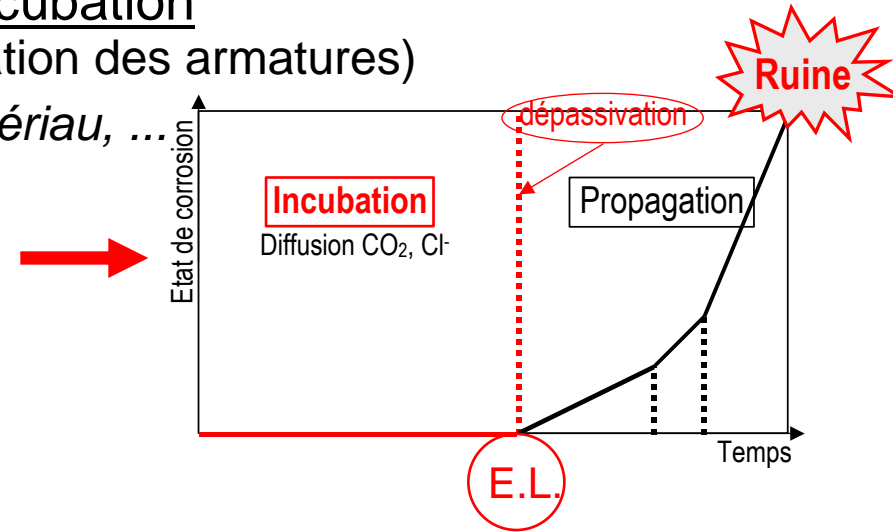
# 5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.



## • Méthodologie • (3)

✘ **Hypothèse** : restriction à la période d'incubation  
(état limite (E.L.) = dépassivation des armatures)

↳ *sécuritaire, approche matériau, ...*



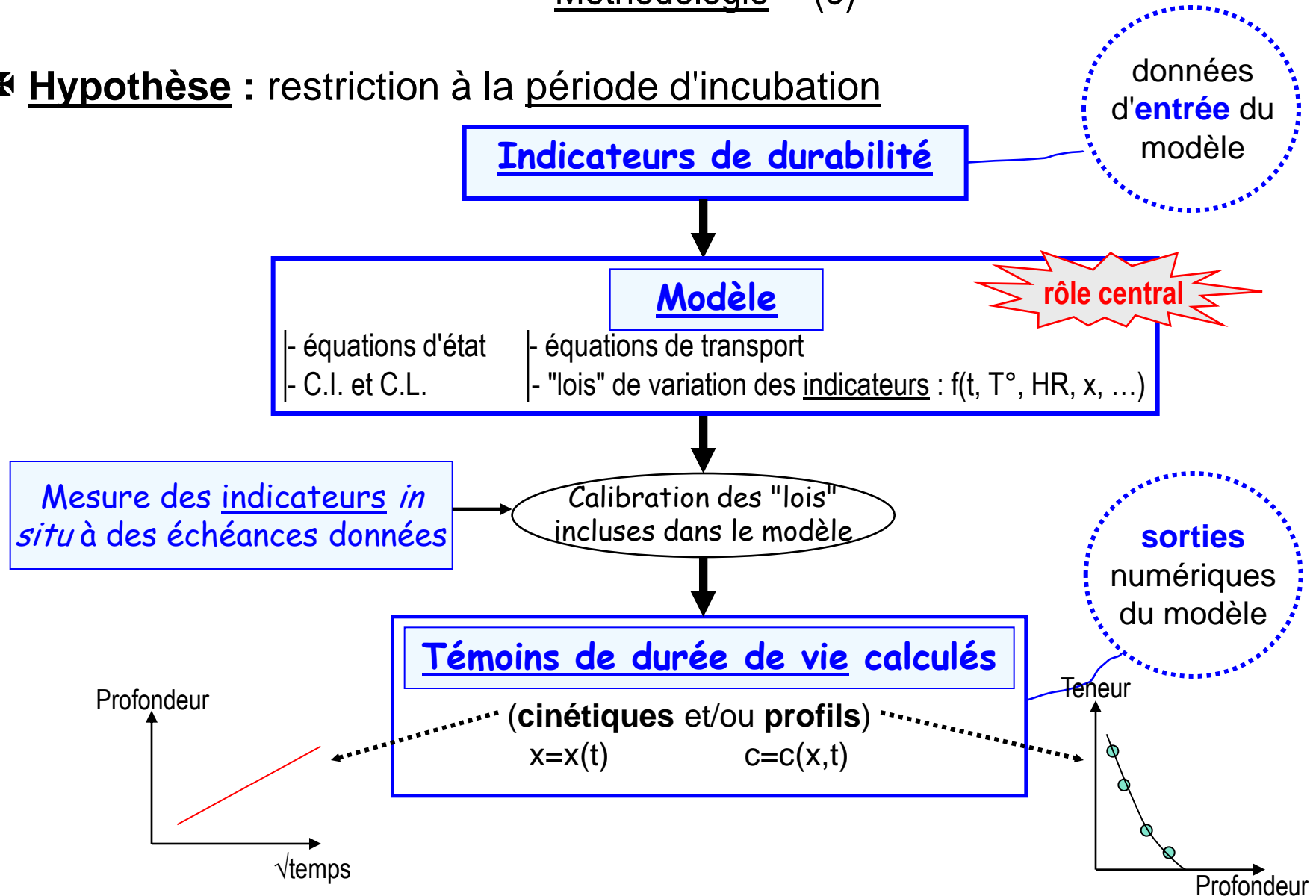
Corrosion des armatures initiée par la carbonatation ou par les Cl<sup>-</sup>

# 5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.



## • Méthodologie • (3)

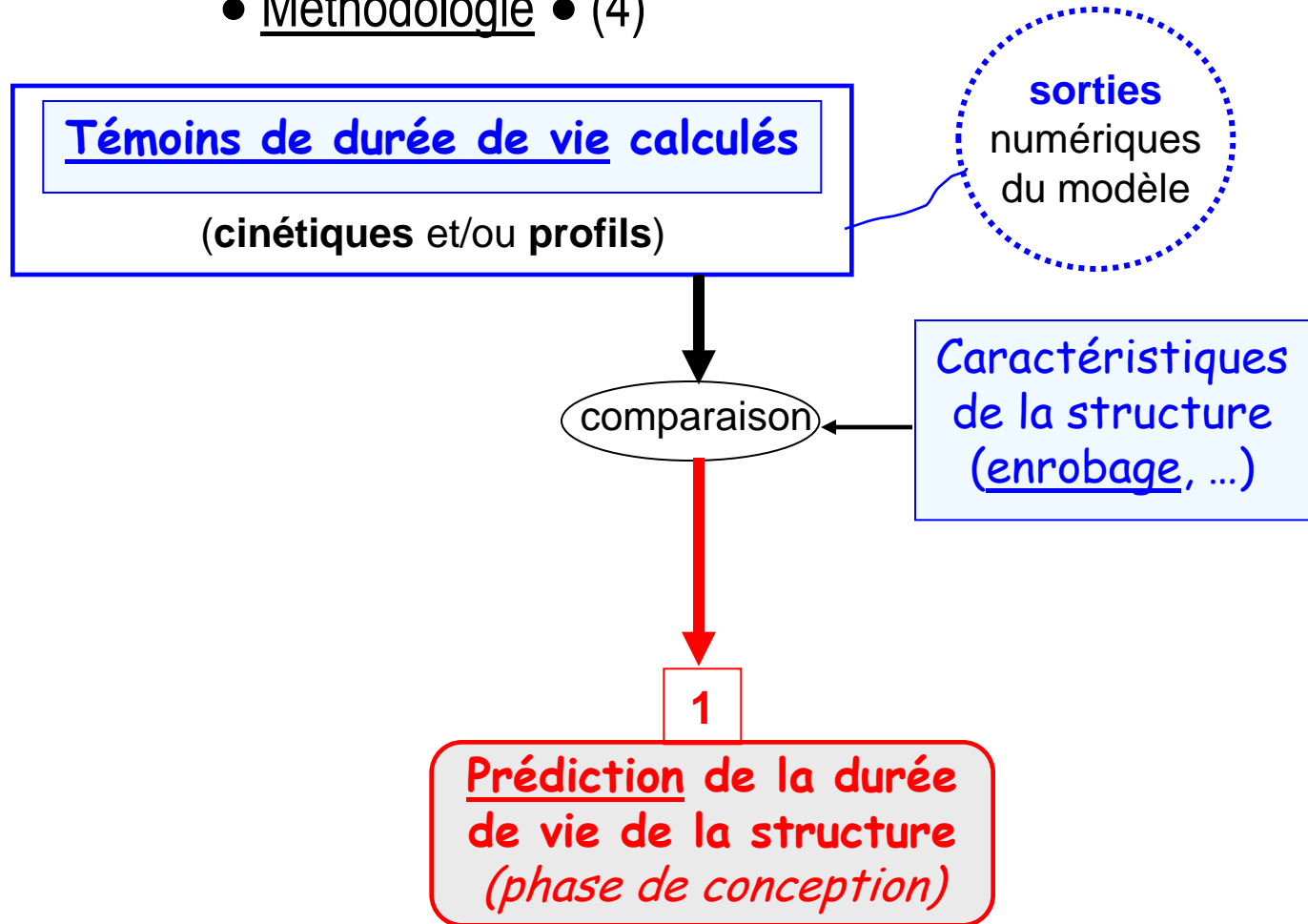
✘ Hypothèse : restriction à la période d'incubation



# 5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.



## • Méthodologie • (4)

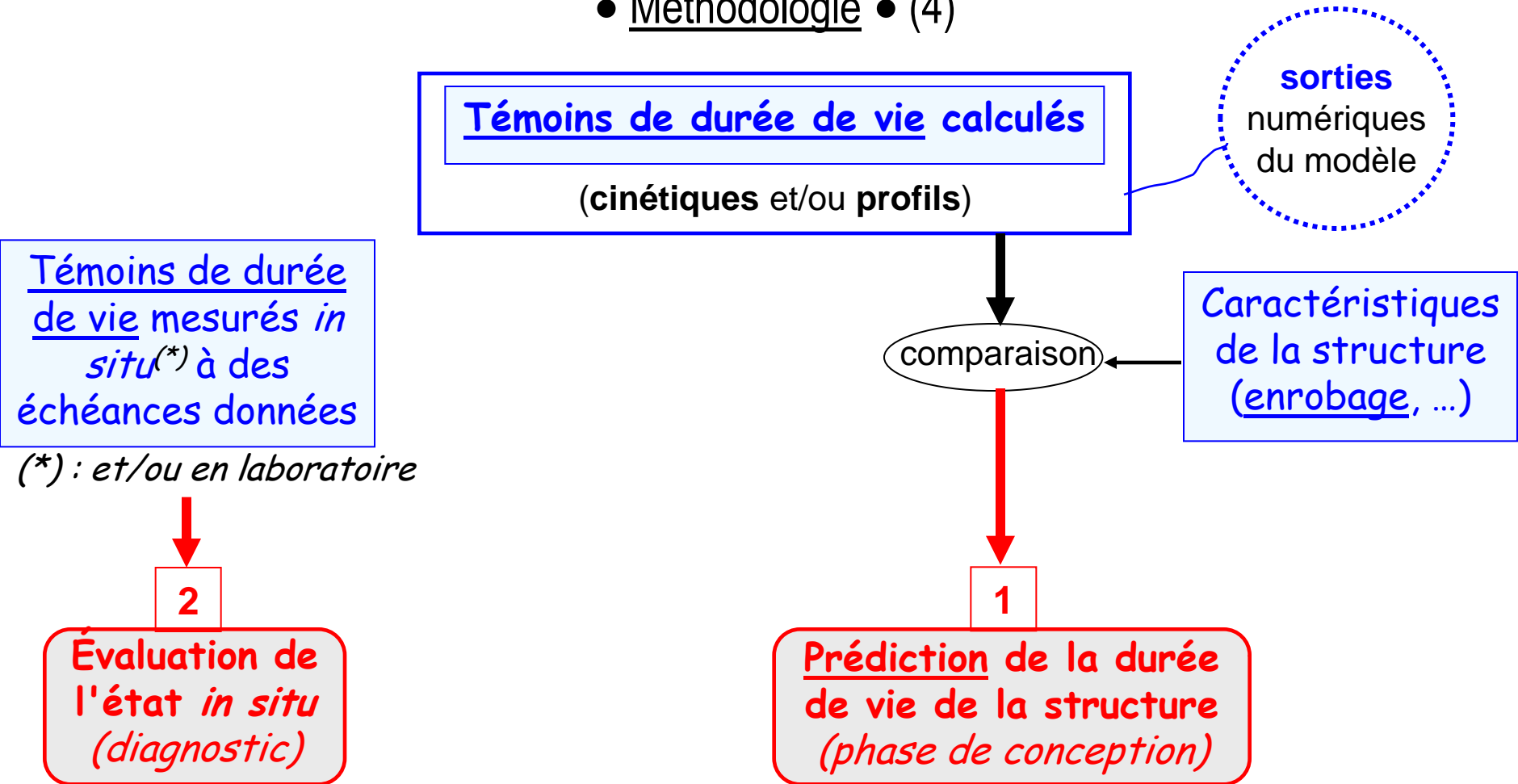




# 5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.



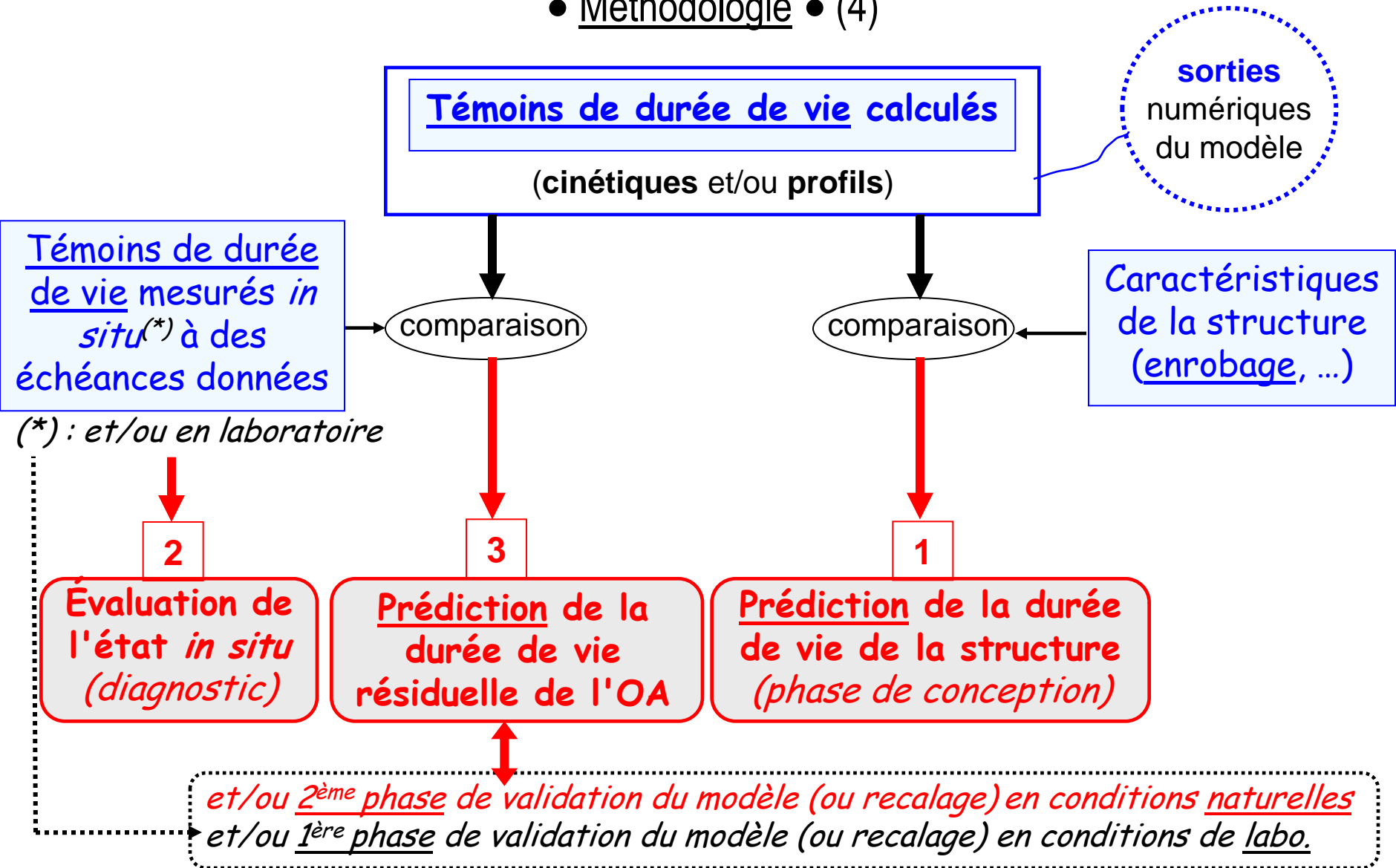
## • Méthodologie • (4)



# 5 - PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES SUR LA BASE D'I.D.



## • Méthodologie • (4)



# 5 - TEMOINS DE DUREE DE VIE



✘ **Témoins de durée de vie** ▲ données pertinentes indispensables pour le suivi *in situ* et la prédiction de la durée de vie (résiduelle) des OA en BA

✘ **Définitions** (corrosion des armatures)

- **Environnement sans chlorure** :

- évolution de la **profondeur carbonatée** (*i.e.* zone où  $\text{pH} \leq 9$ ) en fonction du tps (cinétique)
- ou - **profil de teneur en  $\text{CaCO}_3$**  (ou en  $\text{Ca(OH)}_2$  résiduelle) et évol en fct du tps

- **En présence de chlorures** :

- évolution de la **profondeur de pénétration des  $\text{Cl}^-$**  (*i.e.* zone où  $[\text{Cl}^-_{\text{libres}}] \geq [\text{Cl}^-_{\text{libres}}]_{\text{crit}}$ ) en fonction du tps (cinétique)
- ou - **profil de  $[\text{Cl}^-_{\text{libres}}]$**  et évolution en fonction du tps

- **En conditions non saturées** :

- **profil hydrique** et évolution en fonction du tps

# 5 - MODÈLES PRÉDICTIFS

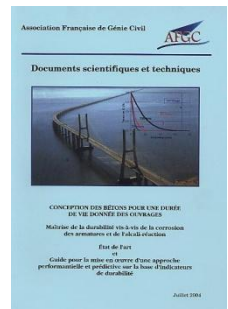


## • Caractéristiques requises •

- **indicateurs de durabilité** (+ param. complém.) ▲ données d'entrée
- **témoins de durée de vie** (cinétiques & profils) ▲ sorties
- fondés d'un point de vue physique et chimique
- flexibles et facilement accessibles
- cadre déterministe ou probabiliste

➔ **sélection d'un éventail de modèles validés** ayant **différents niveaux de sophistication**

➔ **Etat de l'art + Critères de sélection  
+ Exemples**



# 5 - MODÈLES PRÉDICTIFS



## • Caractéristiques requises •

- **indicateurs de durabilité** (+ param. complém.) ↗ données d'entrée
- **témoins de durée de vie** (cinétiques & profils) ↗ sorties
- fondés d'un point de vue physique et chimique
- flexibles et facilement accessibles
- cadre déterministe ou probabiliste

modèles phys.-chim.

- incluant les **couplages** (physicochimiques, multi-espèces, ...)
- applicables en conditions **partiellement saturées** :
  - *séchage naturel*
  - *cycles réels d'humidification-séchage*
- incluant les **modifications microstructurales** induites par les dégrad. :
  - ↘ *espace poreux par carbonatation ou cristallisation de sels*
  - ↗ *porosité par lixiviation*
  - *modification de la structure poreuse par formation de sel de Friedel*
- si possible **multi-échelles** (du mat. à la structure)

voir par ex.

[Maekawa & Ishida, 2001  2007]

# 5 - CONCEPT MULTI-NIVEAUX APPLIQUÉ À LA MODÉLISATION DE LA CARBONATATION



Approches ingénieur

- Modèles physico-chimiques **analytiques**

- ↳ front de carbonatation raide (loi en  $\sqrt{t}$ ) [Papadakis et al., ACI, 1991]

- Modèles physico-chimiques **semi-analytiques**

- ↳ approche de Papadakis + **cycles** d'humidification-séchage [Bakker, 1993]

- ↳ améliorations : absence carbo. qd HR  $\geq$  80% + modèle physique de transport hydrique [Thiery et al., CONMOD'08, 2008]

↳ extension aisée : cadre **probabiliste**

- ▲ prédictions en termes d'indice de fiabilité ( $\beta$ ) ou de probabilité de défaillance ( $P_f$ )

- ↳ prise en compte des **incertitudes** relatives aux données d'entrée

- ↳ aide à la décision pour l'**optimisation**

- ↳ marges de sécurité appropriées ▲ bénéfices éco. & environ. !

Niveau de sophistication croissant

# 5 - CONCEPT MULTI-NIVEAUX APPLIQUÉ À LA MODÉLISATION DE LA CARBONATATION



Approches ingénieur

## ● Modèles physico-chimiques **analytiques**

↳ front de carbonatation raide (loi en  $\sqrt{t}$ ) [Papadakis et al., ACI, 1991]

## ● Modèles physico-chimiques **semi-analytiques**

↳ approche de Papadakis + **cycles** d'humidification-séchage [Bakker, 1993]

↳ améliorations : absence carbo. qd HR ≥ 80% + modèle physique de transport hydrique [Thiery et al., CONMOD'08, 2008]

## ● Modèles physico-chimiques **numériques**

↳ modèles complets de **spéciation** (+ processus hydrodyn. en cond. sat.)  
• assemblage des phases à l'équilibre [Matschei, Lothenbach et al., CCR, 2007]

↳ modèles (couplés) **transport-chimie** [Steffens, CCR, 2002], [Bary et al., CCR, 2004], [Saetta et al., CCR, 2004], [Thiery, Ph.D thesis, 2005]

• couplage avec modèle avancé de transport hydrique (**cond. non sat.**)

• modifs. microstructurales

• cinétique des réactions chimiques ▲ *profil de carbonatation adouci*

• chimie de la solution interstitielle ( $[K^+]$ ,  $[Na^+]$ , ...) ▲ évolution du pH

• évolution de la phase solide (ex. décalcification des C-S-H)

Modèles avancés

Niveau de sophistication croissant



## • Spécificités •

[Baroghel-Bouny et al., CCC, 2009]

### → 4 niveaux de sophistication

#### ● Niveau 1 - Modèle de diffusion des chlorures

- diffusion des Cl<sup>-</sup> (en solution diluée) ▲ 1<sup>ère</sup> loi de **Fick**
- interactions Cl-matrice (globales) ▲ isoth. non lin. de **Frenkel**

#### ● Niveau 2 - Modèle multi-espèces (cond. saturées) ▲ **éq. de Nernst-Planck**

- 4 ions + interactions électriques entre ions
- interactions Cl-matrice ▲ différentes options (description + détermination)

#### ● Niveau 3 - Modèle physicochimique avancé (cond. saturées)

- 6 ions + 3 composés solides
- interactions Cl-matrice ▲ adsorption physique sur C-S-H + formation sel de **Friedel** par réactions chimiques instant. (dissol./précip.)
- modif. microstructure et propriétés de transport

#### ● Niveau 4 - Modèle de transport combiné humidité-ions

- niveau 2 étendu aux conditions non saturées
- mouvement phase liquide ▲ loi de **Darcy**
- diffusion vapeur d'eau ▲ 1<sup>ère</sup> loi de **Fick**

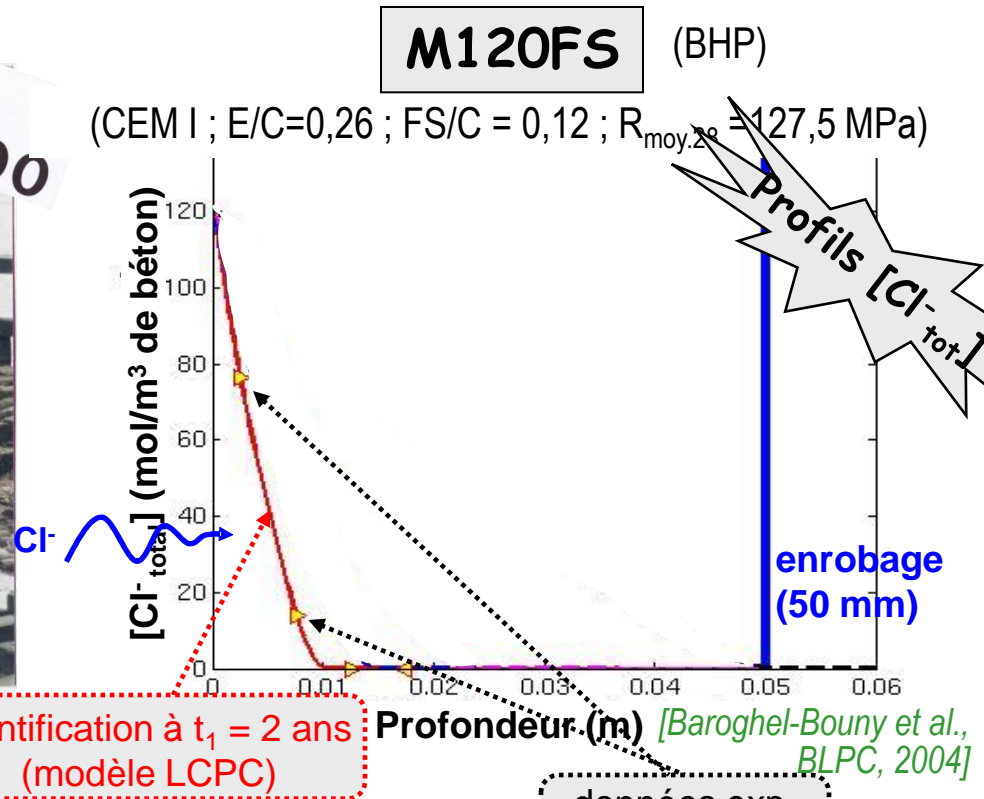
Approche multi-espèces  
Couplage transport-chimie  
Conditions non-saturées



# 5 - PRÉDICTION DES PROFILS DE $[Cl^-]$ ET DE LA DURÉE DE VIE EN ENVIRONNEMENT MARIN PAR LE MODÈLE MULTI-ESPÈCES (NIVEAU 2)

✧✧✧✧✧

## Corps d'épreuve en BA sur le site de La Rochelle (zone de marnage)



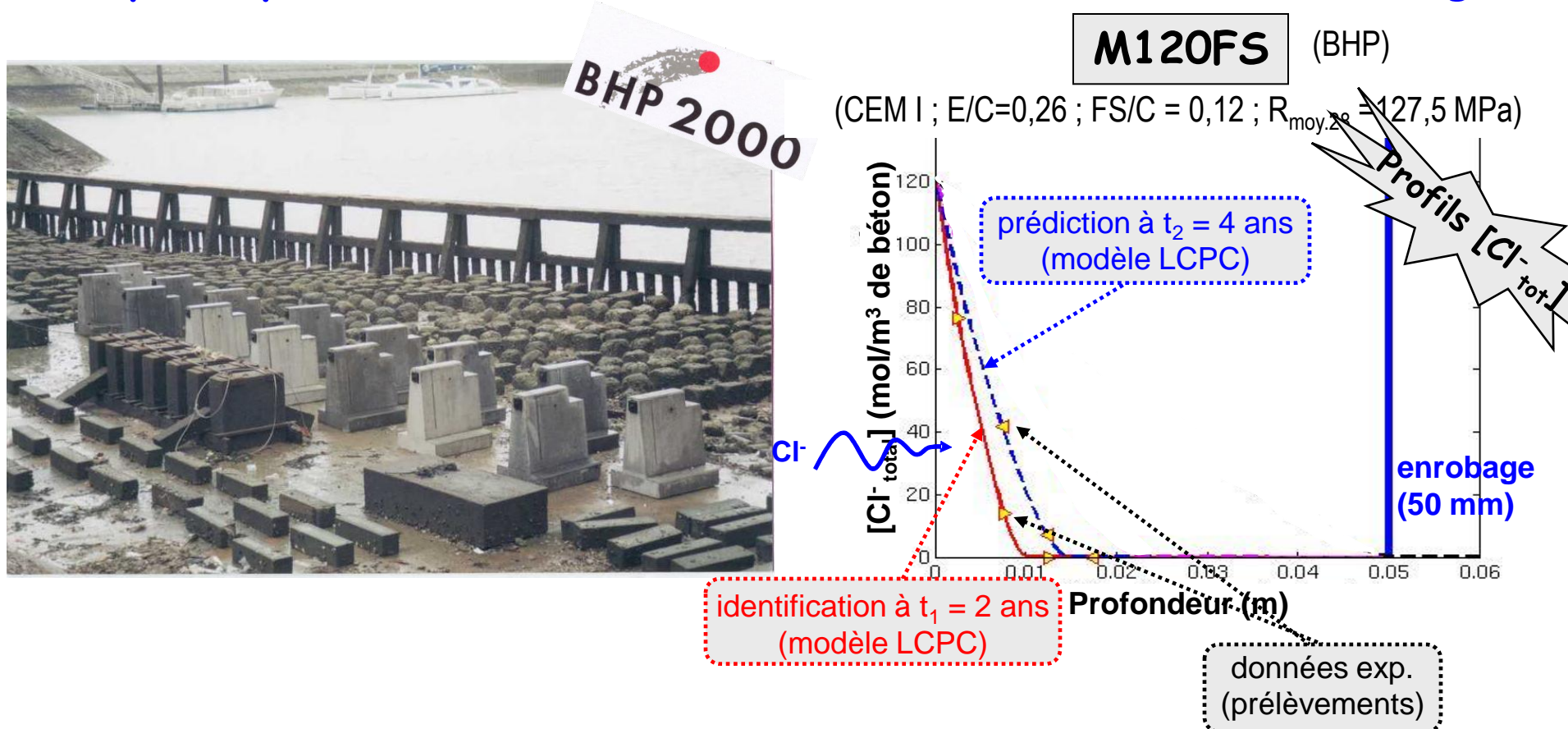
↙ Identification des données d'entrée ( $D_{Cl}$ , isotherme d'interaction, ...) par **analyse inverse** à partir d'un **profil exp. de  $[Cl^-_{tot}]$**

↙ Méthode particulièrement appropriée au suivi de structures existantes

# 5 - PRÉDICTION DES PROFILS DE [Cl<sup>-</sup>] ET DE LA DURÉE DE VIE EN ENVIRONNEMENT MARIN PAR LE MODÈLE MULTI-ESPÈCES (NIVEAU 2)

✧✧✧✧✧

## Corps d'épreuve en BA sur le site de La Rochelle (zone de marnage)



↙ Comparaison entre simulations numériques et mesures

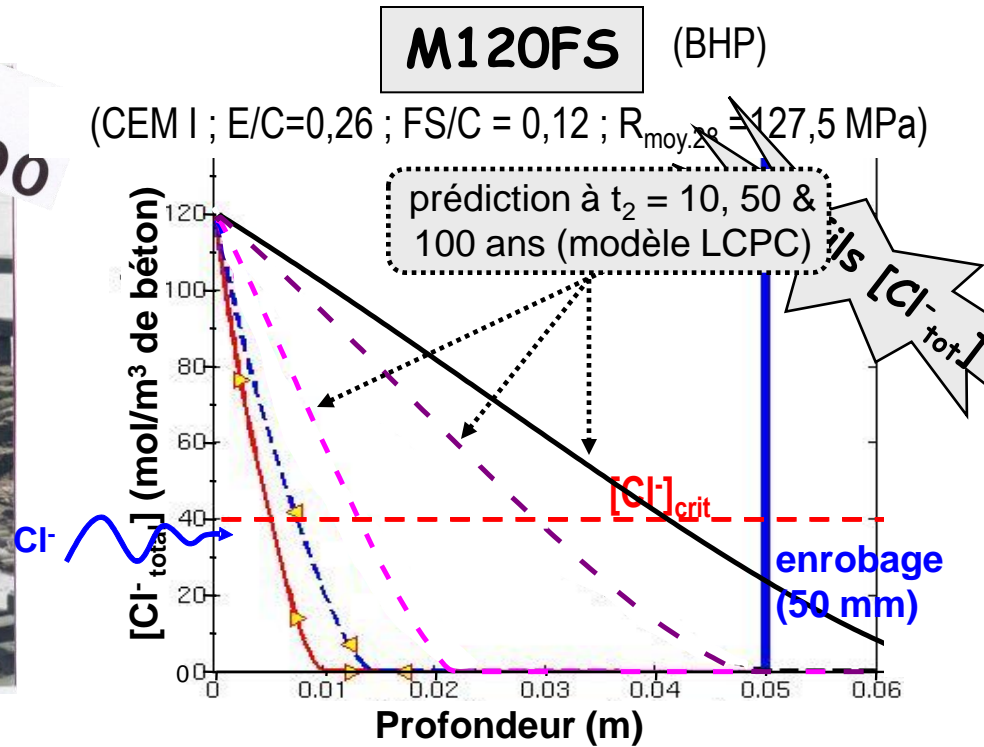
➔ **2<sup>ème</sup> phase de validation** (en environ. naturel) ou **recalage** du modèle

↙ *bonne concordance à  $t_2 = 4$  ans*

# 5 - PRÉDICTION DES PROFILS DE [Cl<sup>-</sup>] ET DE LA DURÉE DE VIE EN ENVIRONNEMENT MARIN PAR LE MODÈLE MULTI-ESPÈCES (NIVEAU 2)



## Corps d'épreuve en BA sur le site de La Rochelle (zone de marnage)



[Baroghel-Bouny et al., MS&T'08, 2008]

↙ Calculs aux échéances ultérieures

➔ **Prédiction** de l'évolution future de la structure (à long terme)

➔ **Durée de vie (période d'incubation) > 100 ans**



# 5 - SPÉCIFICATIONS RELATIVES AUX INDICATEURS DE DURABILITÉ EN FONCTION DU TYPE D'ENVIRONNEMENT ET DE LA DURÉE DE VIE EXIGÉE



- Exemple : protection contre la corrosion initiée par les Cl<sup>-</sup> (enrobage = 50 mm)


Type d'environnement → Durée de vie exigée / Niveau d'exigence ↓	5 (exposition aux sels marins)		6 (immersion dans l'eau de mer)	7 (zone de marnage)
	5.1	5.2		
< 30 ans Niveau 1	•P <sub>eau</sub> < 16	•P <sub>eau</sub> < 14	•P <sub>eau</sub> < 15	•P <sub>eau</sub> < 14
de 30 à 50 ans Niveau 2	•P <sub>eau</sub> < 15	•P <sub>eau</sub> < 11	•P <sub>eau</sub> < 13	•P <sub>eau</sub> < 11
de 50 à 100 ans Niveau 3	•P <sub>eau</sub> < 14	•P <sub>eau</sub> < 11 •D <sub>app(mig)</sub> < 2 •K <sub>liq</sub> < 0,1	•P <sub>eau</sub> < 13 •D <sub>app(mig)</sub> < 7	•P <sub>eau</sub> < 11 •D <sub>app(mig)</sub> < 3 •K <sub>liq</sub> < 0,1
de 100 à 120 ans Niveau 4	•P <sub>eau</sub> < 12 •D <sub>app(mig)</sub> < 20 •k <sub>liq</sub> < 0,1	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 1 •K <sub>app(gaz)</sub> < 30 •k <sub>liq</sub> < 0,01	•P <sub>eau</sub> < 12 •D <sub>app(mig)</sub> < 5	•P <sub>eau</sub> < 10 •D <sub>app(mig)</sub> < 2 •K <sub>app(gaz)</sub> < 100 •k <sub>liq</sub> < 0,05
> 120 ans Niveau 5	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 10 •K <sub>app(gaz)</sub> < 30 •k <sub>liq</sub> < 0,01	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 1 •K <sub>app(gaz)</sub> < 30 •k <sub>liq</sub> < 0,01	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 1	•P <sub>eau</sub> < 9 •D <sub>app(mig)</sub> < 1 •K <sub>app(gaz)</sub> < 30 •k <sub>liq</sub> < 0,01

**M120FS**

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{eau}} = 7,4\% ; D_{\text{app(mig)}} = 0,04 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ K_{\text{app(gaz)}} = 43 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 ; k_{\text{liq}} = 10^{-5} \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \end{array} \right.$$

[Baroghel-Bouny et al., CCC, 2009]

# Plan

- 1 - Introduction : nouvelle approche de la durabilité
- 2 - Indicateurs de durabilité : caractéristiques et pertinence
- 3 - Classes associées aux indicateurs de durabilité
- 4 - Spécifications performantielles, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée
- 5 - Prédiction de la durée de vie des structures : témoins de durée de vie et modélisation "multi-niveaux"
-  6 - *Conclusion : boîte à outils pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité*

# 6 - NOUVELLE APPROCHE DE LA DURABILITÉ



✘ Approche intégrée **exp./mod.** et "multi-niveaux"

✘ Chaque outil a une fonction bien définie et intervient à une étape précise  
↳ **Indicateurs de durabilité** ≠ **Témoins de durée de vie** ↗ *mesures distinctes*

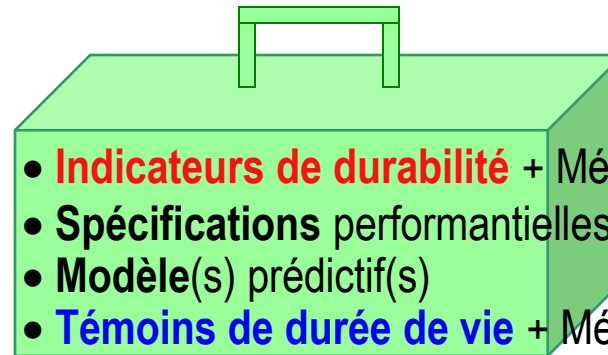
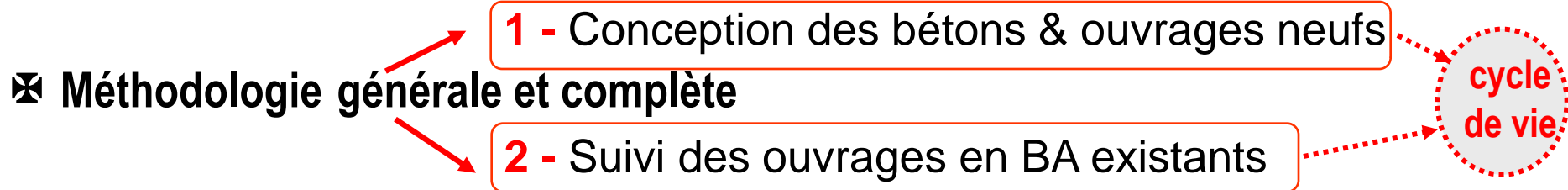
✘ Modèles ↗ Ppales entrées ↗ **Indicateurs de durabilité** (données pertinentes & facilit<sup>e</sup> accessibles)  
↗ 2 étapes de validation (labo. + *in situ*) + étude de sensibilité préalablement à toute prédiction

✘ **Viser des niveaux de performance / durée de vie spécifiés**

↳ *plus grande liberté*

↳ *nouveaux concepts de formulation & matériaux high-tech, ..., dans le contexte du **développement durable***

# 6 - BOÎTE À OUTILS POUR L'ÉVALUATION ET LA PRÉDICTION DE LA DURABILITÉ



➔ **Évaluation et prédiction de la durabilité** à l'aide d'un **éventail de propriétés du matériau** (signification physique précise + accessibilité par des méthodes bien définies & validées)

↙ **méthodologie scientifiquement fondée ... mais facile à utiliser !**

# 6 - CONCLUSION



↙ *la durabilité, c'est pérenniser cela ...*



*Pont de Millau, 2004 (France)  
Durée de vie spécifiée = **120 ans***



*Pont de la Confédération, 1997 (Canada)  
Durée de vie spécifiée = **100 ans***





Merci pour votre attention ...